

# Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

**Eliminace odpružení ocelových tenkostěnných trubek při ohýbání v závislosti  
na velikosti úhlu ohybu**

**Elimination of springing of thin-walled steel pipes while bending with  
dependance on the size of the bending angle**

Marek Špaček

**KSP-TP-B-**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

**Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 50

Počet tabulek: 9

Počet příloh: 1

Počet obrázků: 48

Datum: 24. 05. 2013



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

**M a r e k Š P A Č E K**

Studijní program

**B2341 Strojírenství**

Studijní obor

**3911R018 Materiály a technologie**

Zaměření

**Tváření kovů a plastů**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářské práce na téma:

### **Eliminace odpružení ocelových tenkostěnných trubek při ohýbání v závislosti na velikosti úhlu ohybu**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznámení se s problematikou výroby hydraulických prvků ve společnosti Knomí s. r. o., (používané stroje, nástroje a postupy, používané materiály atd.).
2. Charakteristika problematiky odpružení při ohýbání trubek a tvarových profilů.
3. Určení velikosti odpružení konkrétních ohýbaných trubek v závislosti na nastaveném úhlu ohybu.
4. Vyhodnocení získaných výsledků.
5. Závěr.





Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva: v rozsahu cca 30 stran

- přílohy: grafy, tabulky

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] VÍTEK ANTONÍN :*Ohýbání trubek*, Státní nakladatelství technické literatury, 1.vydání, Praha 1966, 160 s, L13-B2-IV-31/22033/III.
- [2] BAREŠ, K: *Lisování*, Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1971.
- [3] TSCHÄTSCH, H.:*Metal Forming Practise, Processes - Machines - Tools*. 1. vydání, [s.l.], Springer, 2006, 417 s. ISBN 3540332162.
- [4] Technická firemní dokumentace.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.



prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci dne 15. 2. 2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. ( v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



# **Anotace**

## **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI** **Fakulta strojní**

### **Katedra strojírenské technologie** **Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Marek Špaček

Téma práce: Eliminace odpružení ocelových tenkostěnných trubek při ohýbání v závislosti na velikosti úhlu ohybu  
Elimination of springing of thin-walled steel pipes while bending with dependance on the size of the bending angle

Číslo BP: KSP-TP-B-

Vedoucí BP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Klíčová slova: Ohýbání, trubka, zpětné odpružení

Key words: Bending, tube, backspring

#### **Abstrakt:**

Tato bakalářská práce se zabývá ohýbáním trubek za studena a jejich zpětnému odpružení. V úvodu se seznámíme se společností Knomi s.r.o. V teoretické části je představena technologie ohýbání trubek za studena, výpočty zpětného odpružení a stroje používané na ohýbání. V experimentální části práce se zjišťuje materiál trubek a jejich zpětné odpružení pomocí měření a výpočtu. V poslední části se porovnávají výsledky získané měřením, početně a navrhnou se ideální přehyby trubek.

#### **Abstract:**

This bachelor thesis deals with bending pipes under cold conditions and their return springing. In the introduction we get to know Knomi s.r.o. company. Then, the technology of bending pipes under cold conditions, calculations of return springing and devices used for bending are presented. In the following part of the paper, the material of the pipes and their return springing by measurement and calculation are being looked into. The last part compares the results acquired by measurement, numerically and it suggests the ideal bends of pipes.



**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. 05. 2013

.....  
Marek Špaček  
Lomová 190  
463 12 Liberec 25

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za jejich velmi cenné rady a čas, který mi věnovali při řešení dané problematiky. Dále nesmím zapomenout poděkovat Tereze Menclové za pomoc s překladem anotace do angličtiny, paní Ing. Michaela Kolnerové, Ph.D. za pomoc s formální stránkou práce a svým příbuzným a kamarádům za upřímnou podporu.

## **Obsah:**

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	7
1. ÚVOD.....	9
2. TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ TRUBEK.....	10
2.1 Trubka jako polotovar .....	10
2.1.1 Rozměry trubek.....	10
2.2 Rozdělení způsobu ohýbání trubek .....	11
2.3 Průběh pružných a plastických deformací při ohýbání trubky za studena a s tím související změny tvaru a napětí, zpětné odpružení .....	16
2.3.1 Základní pojmy a jejich označení .....	16
2.3.2 Průběh pružných a plastických deformací při ohýbání trubky za studena a s tím související změny tvaru a napětí .....	17
2.3.3 Zpětné odpružení.....	19
2.4 Popis nejpoužívanějších způsobů ohýbání trubek za studena .....	21
2.4.1 Ohýbání trubek navíjením s opěrným trnem.....	22
2.4.2 Ohýbání navíjením bez trnu .....	23
2.4.3 Ohýbání zakružováním .....	23
2.4.4 Ohýbání trubek na lisech.....	24
2.5 Prodávané stroje na ohýbání trubek .....	24
2.5.1 Manuální ohýbačky trubek:.....	24
2.5.2 Manuální hydraulické ohýbačky trubek:.....	25
2.5.3 Elektrické ohýbačky trubek.....	25
2.5.4 Elektrohydraulické ohýbačky trubek .....	26
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	27
3.1 Charakteristika použitých materiálů.....	27
3.2 Výsledky a průběh statické tahové zkoušky.....	27
3.3 Měření úhlů na 3D měřidle Mitutoyo Crysta-PlusM 544 .....	29
3.4 Výpočet zpětného odpružení .....	33
4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	38
4.1 Zpracování výsledků do grafu a diskuse k výsledkům.....	38
4.2 Návrh ideálního přehybu trubek.....	41
5. ZÁVĚR.....	46
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	47
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	48
SEZNAM PŘÍLOH.....	50



## **SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ**

ČSN	Česká státní norma
$R_m$	Mez pevnosti v tahu
$R_{p02}$	Smluvní mez kluzu
Cad	Computer-aided drafting, počítačem podporované kreslení
3D	Trojrozměrný, měřidlo je schopno pracovat ve třech osách
TP20	Doteková sonda RENISHAW
DIN	Deutsche Industrie-Norm, Německá národní norma
ISO	International Organization for Standardization, Mezinárodní organizace pro normalizaci
11 353	Neušlechtilá konstrukční ocel s garantovanou mezí pevností 350 MPa, vhodná k výrobě bezešvých trubek na ohýbání
$D$ [mm]	Vnější průměr trubky
$t$ [mm]	Tloušťka stěny trubky
$M_o$ [Nm]	Moment ohýbání
$L$ [mm]	Délka trubky
$P$ [N]	Zatěžující síla
$D_r$ [mm]	Svislý rozměr trubky
$D_p$ [mm]	Rovnoběžný rozměr trubky
$\sigma$ [1]	Poměrná ovalita
$R$ [mm]	Poloměr ohybu, měřený na ideální ose trubky
$R_v$ [mm]	Poloměr ohybu krajních vláken na vnější straně ohybu
$R_m$ [mm]	Poloměr ohybu krajních vláken na vnitřní straně ohybu
$t_v$ [mm]	Tloušťka stěny na vnější straně ohybu
$t_m$ [mm]	Tloušťka stěny na vnitřní straně ohybu
$\alpha$ [°]	Úhel ohybu trubky ve stupních
$k_t$ [1]	Konstanta, vyjadřující poměrnou tloušťku stěny
$\sigma_t$ [MPa]	Napětí v tahu
$\sigma_d$ [MPa]	Napětí v tlaku



$\sigma_{kt}$ [MPa]	Napětí na mezi kluzu v tahu
$\sigma_{kd}$ [MPa]	Napětí na mezi kluzu v tlaku
$R_{kon}$ [mm]	Poloměr ohybu po zpětném odpružení
$\alpha_{kon}$ [°]	Úhel ohybu po zpětném odpružení
$R_r$ [mm]	Poloměr ohybu dokud působí síly a momenty
$\alpha_r$ [°]	Úhel ohybu dokud působí síly a momenty
$m; n$ [1]	součinitelé, kteří zahrnují mechanické vlastnosti materiálu a tloušťku stěny trubky
$\rho_{kon}$ [°]	Úhel odpružení
$K$ [1]	Součinitel zpětného odpružení
$R'$ [mm]	Průměr ohybu trubky
Cu	Označení mědi

## 1. ÚVOD

Společnost Knomi s.r.o. se rozhodla přijít na trh s novými výrobky ohýbaných trubek za studena. V dnešní době, kdy přesahuje nabídka poptávku, je u firem logické, že se na trh snaží přijít s co největším sortimentem výrobků pro zákazníky a tím zaujmout co největší místo na trhu. I přes nepřízeň na trhu, se firma vybavila další špičkovou technologií, která umožňuje velkosériovou, sériovou i kusovou výrobu ve vysoké kvalitě. Tato bakalářská práce se bude zabývat problémem ohýbání trubek. Hlavní problémem u trubek ohýbaných za studena je jejich zpětné odpružení, které dosahuje několika jednotek procent úhlu ohybu. Společnost Knomi s.r.o. potřebuje toto odpružení zjistit, a dohledat jeho závislé veličiny. Byly dodány 4 druhy trubek různých průměrů a různých tloušťek stěn. Od každého průměru trubky bylo ohnuto 11 různých úhlů. Úhly ohybu jsou od 10° do 120°. Trubky byly ohnuty na CNC ohýbačce od výrobce MSV Systems Liberec na přesný úhel a po odlehčení se odpružily o určitý úhel. Tento úhel je možné spočítat, i když výsledky z výpočtů budou značně nepřesné, nebo změřit a potom lze navrhnout ideální přehyb trubky, aby se odpružila na co nejpresnější daný rozměr, který je vyžadován výrobou. [1]

Seznámení s produkty a produkcí společností Knomi s.r.o. :



Obr. 1 Logo Knomi s.r.o.[1]

„Společnost s ručením omezeným Knomi s.r.o. vznikla v roce 1992. Navázala na dvacetiletou tradici výroby spojovacích prvků do hydraulických obvodů. Sortiment výrobků je neustále rozšiřován, jak strojírenské šroubení tak i hydraulických spojek.“ [2]

Na stránkách [shop.knomi.cz](http://shop.knomi.cz) má společnost Knomi s.r.o. výběr svých výrobků k prodeji, které je možné po internetu objednat. Zde je ukázka Křížové spojky pro spojení trubek z produkce společnosti Knomi s.r.o.: [2]



Obr. 2 Křížová spojka vyráběná společností Knomi s.r.o. [3]



## **2. TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ TRUBEK**

### **2.1 Trubka jako polotovar**

„Velká rozmanitost použití trubek v různých odvětvích průmyslu vyžaduje bohatý sortiment trubek, pokud jde o jejich rozměry a jakost materiálu.“ [4]

„Trubky jsou v provozu vystaveny různým mechanickým namáháním vnějšími silami.“ [4] Základními typy namáhání jako tah, tlak, ohyb, smyk, krut, ale také jejich kombinacemi. Dále namáhání přetlakem jak vnějším, tak vnitřním. Přitom mohou být vystaveny tepelnému namáhání, které je způsobeno rozdílným tepelným stavem v jejich objemu a mění se teploty dle času. Na trubky ještě působí chemické vlivy. V praxi se setkáváme s kombinací těchto vlivů. [4]

Požadavky na trubky a potrubí lze přibližně shrnout do 8 bodů:

- 1) „Pevnost a stálost tvaru (v rozmezí pružných deformací) při působení vnějších sil a momentů za normální teploty.
- 2) Pevnost a stálost tvaru při působení vnějších sil a momentů za současného působení vysokých nebo nízkých teplot.
- 3) Pevnost a stálost tvaru za podmínky 1 a 2 za současného působení i chemických vlivů.
- 4) Odolnost proti otěru (v pneumatické dopravě).
- 5) Odolnost proti korozivním a jiným chemickým vlivům.
- 6) Velká tepelná vodivost nebo naopak izolační vlastnosti.
- 7) Elektrická vodivost nebo nevodivost.
- 8) Různé technologické požadavky – pružnost, velká tvárnost, obrobiteľnosť atp.“ [4]

Nejběžnějším materiálem používaným pro výrobu trubek je ocel, poněvadž splňuje většinu vyjmenovaných kladených požadavků na trubky a je při svých výborných vlastnostech poměrně levná. Při ohýbání trubek z jiných materiálů lze využít většinu poznatků z ohýbání ocelových trubek. Zmínky o ohýbání jiných materiálů jsou uvedeny většinou jen v těch případech, kde vysvětlení určitého děje je snazší právě u jiných materiálů, než je ocel. [4]

#### **2.1.1 Rozměry trubek**

„K ohýbání trubek se používá různých nástrojů, které svým tvarem a rozměrem musí být přizpůsobeny rozměru ohýbané trubky. Proto je dále uveden přehled rozměrů ocelových trubek.“ [4]

Ocelové bezešvé trubky jsou buď válcované, nebo tažené zatepla. Dle ČSN 42 5710, ČSN 42 5711 atd. Při zpracování trubek je důležitý vnější průměr trubky  $D$  [mm] a tloušťka stěny  $t$  [mm]. Tyto trubky se vyrábějí z konstrukčních a ušlechtilých ocelí třídy 10 až 16. Rozměry trubek dle rozměrové normy ČSN 42 5715 a ČSN 42 5716. Trubky se vyrábějí s vnějším průměrem od 22 mm do 317 mm, s tloušťkou stěny od 2,5 do 36 mm.

Pro zpracování trubek ohýbáním jsou důležité odchylky rozměrů trubky. Dle ČSN zjistíme mezní úchytky. Např. ČSN 42 5715 má mezní úchytky větší, než ČSN 42 5716. Ale rozměry trubek jsou stejné.



Při ohýbání trubek jsou úchytky vnějšího průměru a tloušťky stěny velmi důležité. Tyto tolerance značně ovlivňují výsledky i jakost ohýbání.

Pro potrubí, která musí být velmi kvalitní, se často používá ocelových bezešvých trubek závitových, dle ČSN 42 5710 a ČSN 42 5711. Označují se jmenovitou světlostí v anglických palcích. [4]

## 2.2 Rozdělení způsobu ohýbání trubek

Při praktickém použití trubek se vyskytují nejrozumnější tvary ohybů. Z hlediska geometrického jsou to:

- 1) „Ohyby ležící v jedné rovině (tyto ohyby se vyskytují nejčastěji na potrubí ve volných prostorech – venkovní potrubí)
- 2) Ohyby v několika rovinách (tyto ohyby se vyskytují tam, kde je nutno přizpůsobit tvar potrubí jinému výrobku, např. kotli nebo stroji)
- 3) Ohyby prostorové, u kterých je tvarem trubky sledován určitý technologický účel, jako je tomu např. u topných hadů ve tvaru spirály nebo šroubovice.“ [4]

K dosažení určitého geometrického tvaru potrubí je možno použít různých způsobů ohýbání. Volba závisí především na materiálu trubky, na jejím rozměru a na požadavku minimálního poloměru ohybu.

Omezení ohýbání:

- a) „tažnost materiálu (za tepla, za studena)
- b) dosažení správného geometrického tvaru bez vlnění na vnitřní straně ohybu.“ [4]

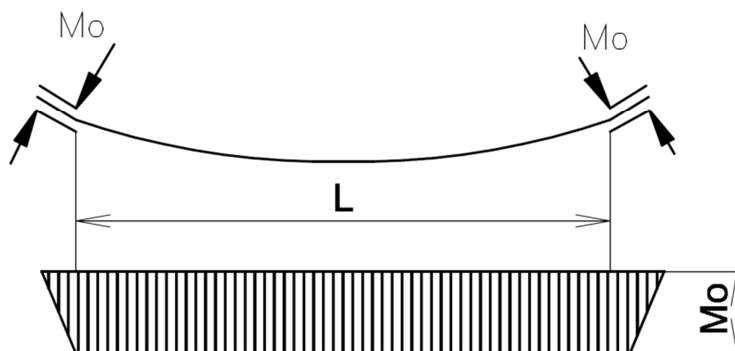
Jednotlivými způsoby je pak možno dosáhnout různých výsledků.

Během doby bylo vyvinuto velké množství způsobů ohýbání, z nichž některých bylo použito pro řešení zcela speciálních úkolů.

Způsobů ohýbání je spousta a není možné všechny vyjmenovat, jelikož konstruktér ohýbacího stroje má mnoho možností. Nejvýhodnější se zdá rozdělení způsobu ohýbání podle momentů a sil působících na trubku při ohybu bez zřetele na to, zda se ohýbá za studena nebo za tepla.

Pak je možné rozdělit ohýbání trubek do těchto skupin:

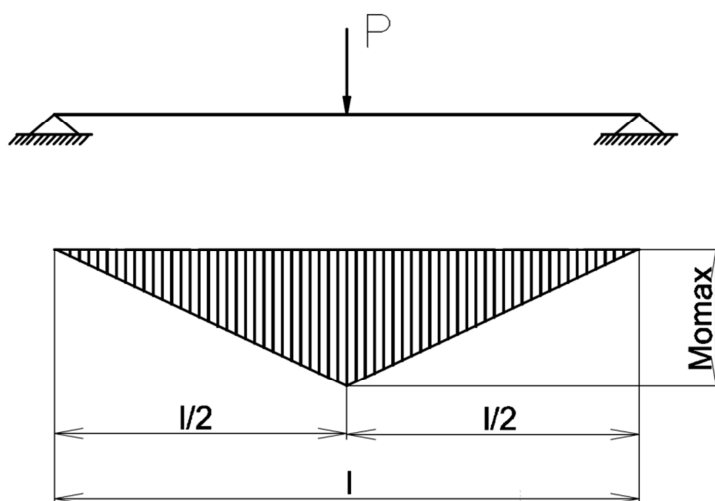
- 1) Ohýbání pouhým ohybovým momentem bez působení příčných sil kolmých k ose ohýbané trubky (obr. 3).



Obr. 3 Ohýbání pouhým momentem [4]

Z obrázku je jasné, že průběh momentu ohýbání  $M_0$  v celé délce ohybu trubky je konstantní, a proto by mělo nastat rovnoměrné ohýbání v celé délce  $L$  na stejný poloměr ohybu. Pokud ale ohyb překročí mez kluzu, projeví se nestejnorodost materiálu i různé odchylky tvaru příčného řezu trubkou. Při ohýbání trubek dochází k poměrně velkému stupni tváření (nejvíce ve vnějších pásmech materiálu). Jelikož při překročení kluzu nastává nestejné prodlužování jednotlivých vláken ohýbané trubky, dochází k borcení. Přispívají k tomu i síly, které se snaží průřez zploštit, čímž se zároveň mění průřezový modul ohýbané trubky. Proto není tento způsob ohýbání vhodný a v praxi se téměř nepoužívá. Využití převážně pro ohýbání trubek velkých průměrů při malém zakřivení (tj. při velkém poloměru ohybu).

2) Ohýbání momentem vyvolaný příčnými silami působící na ohýbanou trubku. Tento případ je z hlediska mechaniky stejný jako namáhání nosníku na dvou podporách zatíženého osamělou silou  $P$  (obr. 4).

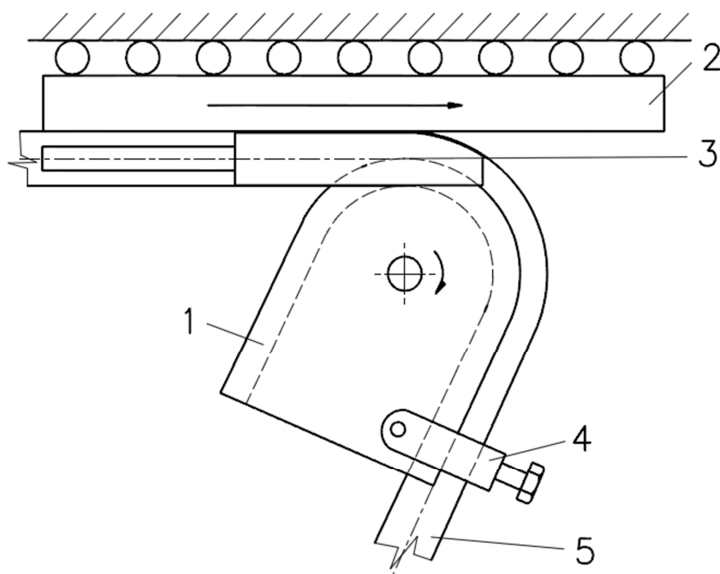


Obr. 4 Ohýbání příčnou silou [4]

V tomto případě se velikost ohybového momentu mění po celé délce trubky  $l$ . Velikost momentu nabývá maxima pod zatěžující silou a klesá na nulu k podporám. Působíště sil vzhledem k trubce se nemění. Tento způsob se používá při ohýbání trubek na lisech. Trubka mění tvar podle tvárníku a nakonec se v příčném řezu kalibruje.

3) Ohýbání navíjením na tvarový segment. Ohyb probíhá postupně, příčné síly kolmé k ose trubky mění vzhledem k trubce svá působíště. Při ohýbání navíjením působí ještě osově síly vyvozené třením trnu a přítlačné lišty, které způsobují přídatný tah. Tento způsob je jedním z nejpoužívanějších při ohýbání zastudena u ohybů do  $180^\circ$ . Lze ho rozdělit na tyto dvě skupiny:

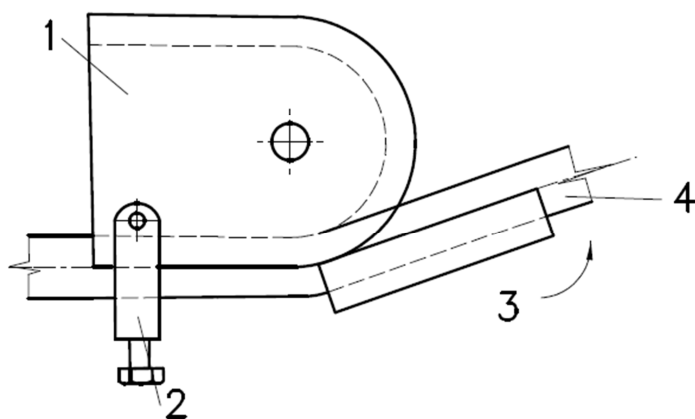
a) ohýbání s opěrným trnem, při kterém se ohýbací segment otáčí a trubka na něm upnutá se k němu přitlačuje. Proti zploštění je trubka vyztužena trnem (obr. 5).



**Obr. 5 Ohýbání na trnu navíjením na segment [4]**

1 - segment, 2 - lišta, 3 - trn, 4 - upínka, 5 - trubka

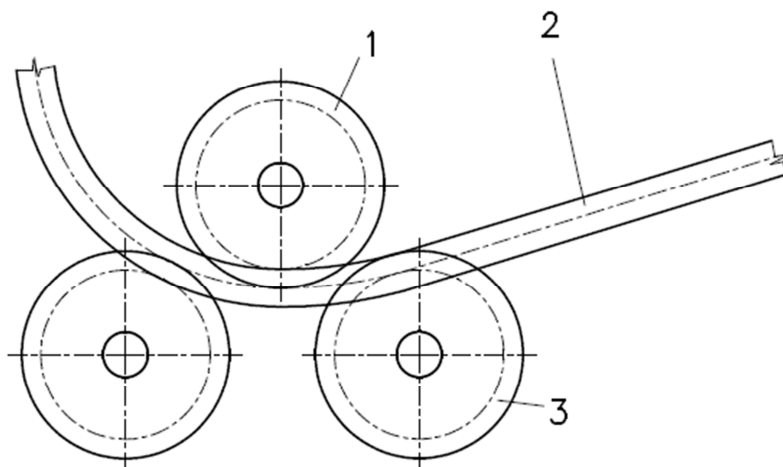
b) Ohýbání bez trnu. Při tomto způsobu se ohýbací segment nepohybuje a trubka je na tento segment dotlačována a navíjena tvarovou lištou nebo tvarovým kotoučem (obr. 6).



**Obr. 6 Ohýbání bez trnu navíjením na segment [4]**

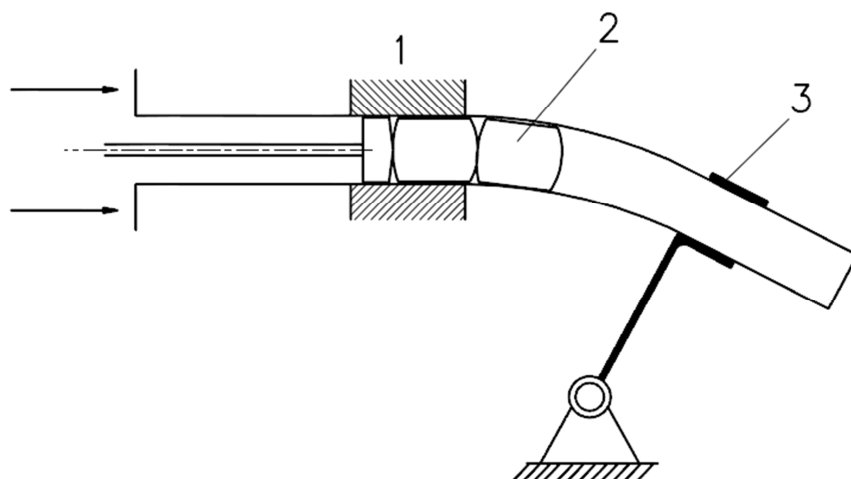
1 – pevný segment, 2 – upínka, 3 – otočná lišta, 4 - trubka

4) Ohýbání zakružováním mezi třemi nebo více kotouči. Ohybový moment je opět vyvozen silami kolmými k ose trubky, které vzhledem k trubce mění své působíště. Trubka při ohýbání je buď ohýbacími kotouči vtahována, nebo je mezi kotouče vtlačována. Podle toho vznikají různé přídatné síly. Kromě ohýbacího momentu může působit i moment kroutcí, takže je možno zakružovat i do tvaru šroubovice (obr. 7).



**Obr. 7 Ohýbání zakružováním [4]**  
1 – vnitřní kladka, 2 – trubka, 3 – vnější kladka

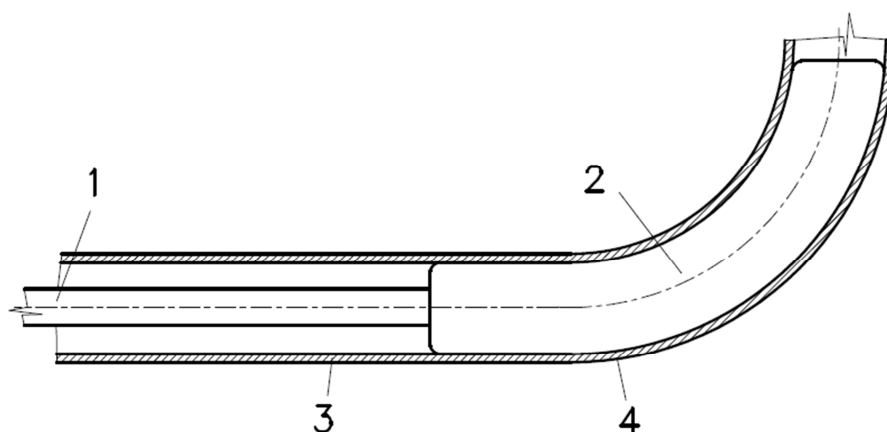
5) Ohýbání vytlačováním ohýbané trubky, která je vedena vodítkem a otáčí se kolem pevného čepu (obr. 8). Ohybový moment je vyvozen příčnými silami,



**Obr. 8 Ohýbání vytlačováním [4]**  
1 – vodítko, 2 – trn, 3 – upínací čelist

kolmými k ose ohýbané trubky za současného působení osově síly (tlaku), která vzniká při vytlačování trubky. Síly mění vzhledem k trubce svá působíště. Trubka se vytlačuje nejčastěji hydraulickým pístem. K vyztužení trubky proti zploštění a zborcení se používá článkového trnu.

6) Ohýbání trubky jejím převlekáním přes tvarový trn (obr. 9). U tohoto způsobu je velmi složitý průběh sil a momentů. Síly vyvolané třením jsou poměrně velké. Nejčastěji ohýbáme zatepla. Po ohybu se kolena kalibrují v zápustce na lisu.

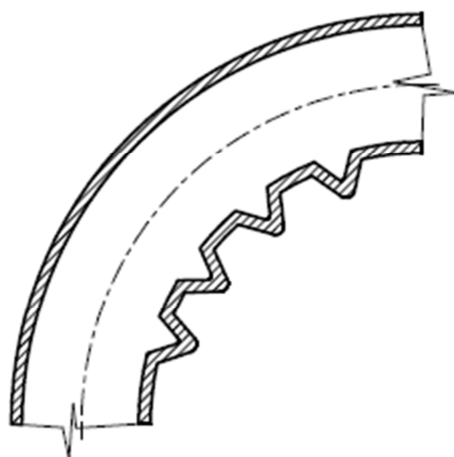


**Obr. 9 Výroba kolen na tvarovém trnu [4]**

1 – trnová tyč, 2 – trn, 3-4 - trubka

7) Ohýbáním vyválnčováním určitých částí stěny trubky. Vyválnčováním se stěna trubky v určitém místě zeslabí, ale zároveň protáhne. Tím je možno dosáhnout ohybů v různých prostorových tvarech.

8) Ohýbání vytvořením záhybů. Tento způsob je ohýbáním momentem působený příčnými silami. Ohýbá se zásadně zatepla. Na ohřátý výsek stěny trubky působí tlak, při kterém nejdříve vzniká pěchování, pak vybočení stěny trubky a vytvoření záhybu (obr. 10). [1]

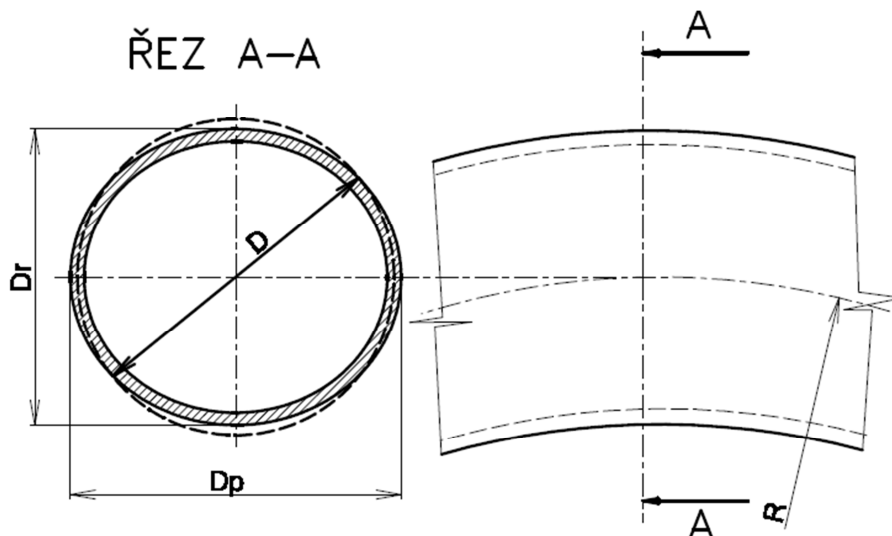


**Obr. 10 Záhybový ohyb [4]**

## 2.3 Průběh pružných a plastických deformací při ohýbání trubky za studena a s tím související změny tvaru a napětí, zpětné odpružení

### 2.3.1 Základní pojmy a jejich označení

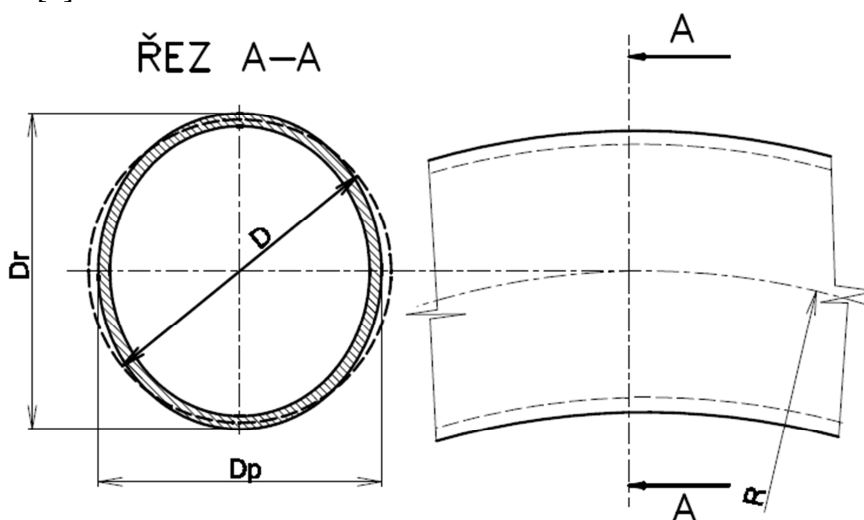
„Kruhový příčný řez trubkou – při ohýbání se mění (může nabývat různých tvarů). Nejčastější je tvar, kde se rozměr trubky ve směru poloměrů ohybu zmenší na hodnotu  $D_r$  a rozměr ve směru k němu kolmém v příčném řezu se zvětší na  $D_p$  – vzniká zploštěný nekruhový tvar příčného řezu trubkou A - A (obr. 11),



Obr. 11 Zploštěný tvar příčného řezu trubkou [4]

Platí  $\frac{D_r}{D_p} < 1$ ;

zde bude tvar zploštěný, může nastat i opak (vydutý tvar) dle vztahu  $\frac{D_r}{D_p} > 1$ ; (obr. 12.). “ [4]



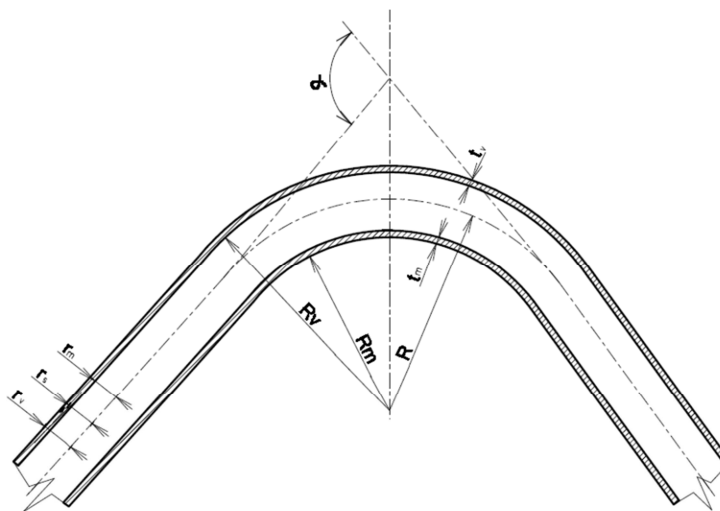
Obr. 12 Vydutý tvar příčného řezu trubkou [4]

Poměrná ovalita dle vzorce (2.1).

$$\sigma = \frac{D_p - D_r}{D} \quad (2.1)$$

Lze jí vypočítat i v procentech. Může nabývat hodnot menších nebo větších než nula. Při kruhovém tvaru je ovalita nulová. [4]

Řez ohnutou trubkou ve tvaru, kdy nepůsobí ohýbací výrobní síly a momenty na (obr. 13).



Obr. 13 Řez ohnutou trubkou [4]

- $R$  - poloměr ohybu, měřený na ideální ose trubky
- $R_v$  - poloměr ohybu krajních vláken na vnější straně ohybu
- $R_m$  - poloměr ohybu krajních vláken na vnitřní straně ohybu
- $t_v$  - tloušťka stěny na vnější straně ohybu
- $t_m$  - tloušťka stěny na vnitřní straně ohybu
- $\alpha$  - úhel ohybu trubky ve stupních

Poloměr ohybu  $R$  se často vyjadřuje jako násobek vnějšího průměru trubky.

Další důležitá veličina je poměrná tloušťka stěny trubky, která se spočítá z poměru tloušťky stěny a průměru trubky dle (2.2).

$$k_t = \frac{t}{D} \quad (2.2).$$

- $t$  - tloušťka stěny trubky před ohýbáním [mm],
- $D$  - průměr ohýbané trubky [mm]
- $k_t$  - konstanta, vyjadřující poměrnou tloušťku stěny [4]

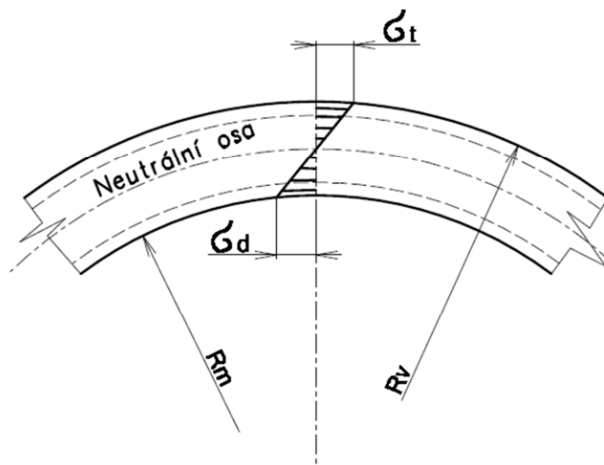
### 2.3.2 Průběh pružných a plastických deformací při ohýbání trubky za studena a s tím související změny tvaru a napětí

„Namáháme-li trubku ohybovým momentem, dochází nejdříve k pružnému ohybu, při kterém je rozložení napětí v příčném řezu lineární (obr 14).“ [4]

„Krajní vlákna na poloměru  $R_v$  jsou namáhána největším tahem  $\sigma_t$  a krajní vlákna na  $R_m$  jsou namáhána největším tlakem  $\sigma_d$ . Směrem k neutrální ose obě napětí postupně klesají, až na neutrální ose se rovnají nule. Neutrální osa při pružném ohybu nezmění svou délku a souhlasí s osou trubky. Při dalším ohýbání překročí napětí v krajních vláknech mez kluzu a prodloužení roste dále. Podobně na tlačené straně dojde k trvalému stlačování. Průběh napětí při trvalých deformacích již není lineární, ale mění se podobně jako u zkušební tyčinky. Tvářením zastudena se materiál zpevňuje, a proto napětí v jednotlivých vláknech vzroste nad mez kluzu. Materiál na

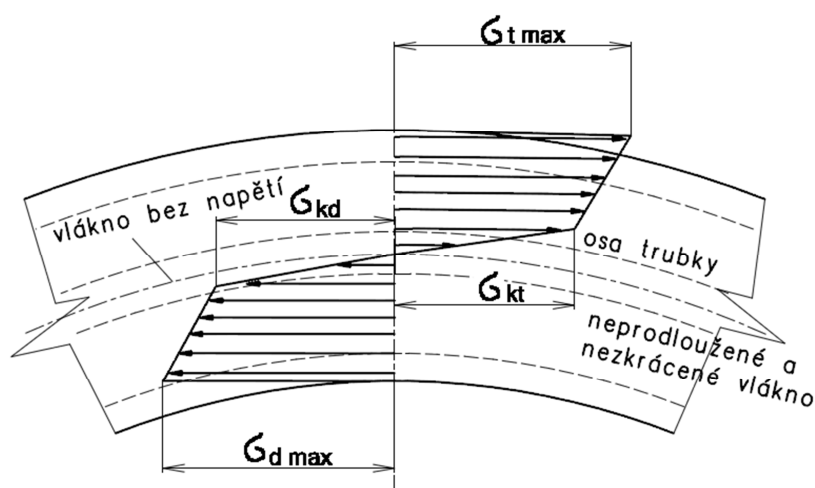


vnější straně ohybu se protahuje a na vnitřní straně se pěchuje. Tím nastává nerovnoměrné rozdělení materiálu v příčném řezu.



**Obr. 14 Rozložení napětí při pružné deformaci v ohýbané trubce [4]**

Tloušťka stěny na vnější straně ohybu klesá, na vnitřní straně roste. Původní neutrální osa přestává být neutrální, ale roste v ní tahové napětí. Nyní není tedy možno mluvit o neutrální ose, ale o vláknu (vlákněch) neprodlouženém a nezkráceném. Poloha tohoto vlákna se postupně přesouvá z neutrální osy směrem k středu ohybu. Při pružném ohybu je neprodlouženým vláknem neutrální osa. Znamená to tedy, že při plastickém ohybu neprodloužené a nezkrácené vlákno prošlo postupně zkrácením a pak prodloužením o stejnou délku (obr. 15).

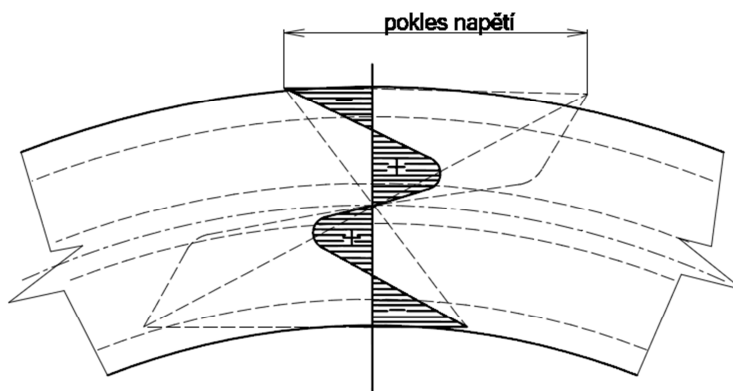


**Obr. 15 Rozdělení napětí v plasticky deformované trubce při ohýbání [4]**

Protože se neprodloužené a nezkrácené vlákno při plastickém ohybu přesouvá směrem ke středu křivosti ohybu, je vystaveno při ohybu tlaku. Existuje tedy ještě vlákno bez napětí, které leží mezi vláknem v ose a vláknem neprodlouženým a nezkráceným.

Přestane-li působit ohýbací moment (je-li trubka uvolněna), trubka částečně odpruží zpět a momenty vnitřních sil se vyrovnají. To však neznamená, že se vyrovná i napětí v příčném řezu. Materiál tvářený zastudena se po odlehčení vrací

podobně jako při pružných deformacích, a to tak, že poklesu napětí je úměrné zkrácení na vnější straně ohybu a prodloužení na vnitřní straně ohybu (obr. 16).

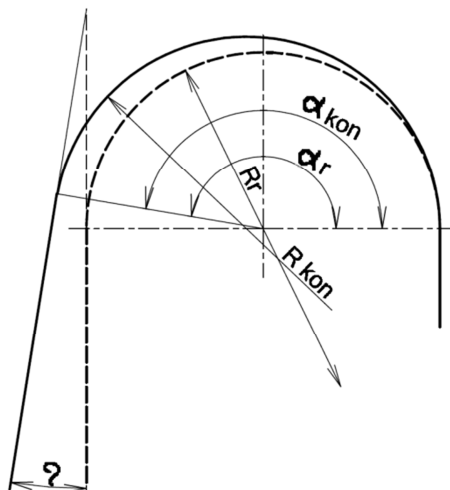


**Obr. 16 Zbýlá napětí v trubce ohýbané zastudena po zhotoveném ohybu po zpětném odpružení [4]**

Z obrázku je zřejmé, že maximální tahové napětí v krajním vláknu přejde při odpružení v tlakové napětí. Jsou to tzv. zbytková napětí. Momenty vnitřních sil vzhledem k vláknu bez napětí jsou však vyrovnány. Při uvolnění trubky po ohybu se trubka pružností částečně napřimuje. Tomuto jevu říkáme zpětné odpružení. “ [4]

### 2.3.3 Zpětné odpružení

U pružných materiálů ohýbaných za studena nastává vždy po konci operace ohýbání a po uvolnění trubky zpětné odpružení. Lze ho vyjádřit dvěma způsoby, buď úhlem odpružení, nebo změnou poloměru ohybu. (obr. 17).



**Obr. 17 Zpětné odpružení [4]**

- - - trubka po a skončeném pohybu, — trubka po zpětném odpružení

- $R_{kon}$  - poloměr ohybu po zpětném odpružení
- $\alpha_{kon}$  - úhel ohybu po zpětném odpružení
- $R_r$  - poloměr ohybu dokud působí síly a momenty
- $\alpha_r$  - úhel ohybu dokud působí síly a momenty



Oproti realitě jsou podmínky zjednodušené. Je uvažováno, že neprodloužené vlákno po zpětném odpružení nezmění svou délku proti okamžiku, kdy na trubku ještě působily síly a momenty.

Platí vztah (2.3): 
$$\alpha_{kon} \cdot R_{kon} = \alpha_r \cdot R_r \quad (2.3)$$

Upraveno (2.4)

$$\frac{\alpha_{kon}}{\alpha_r} = \frac{R_r}{R_{kon}} \quad (2.4)$$

Poloměry ohybu jsou v převráceném poměru k úhlům ohybu.

Výpočet zpětného odpružení je velmi nepřesný, jelikož činitelé ovlivňující zpětné odpružení se značně mění. [4]

„Na zpětné odpružení má vliv:

- a) materiál a rozptyl jeho pevnostních hodnot
- b) Poměr R/D
- c) poměr t/D
- d) velikost přitlačné síly.“ [4]

Tyto činitelé mají značný rozptyl a dosti široké povolené tolerance, a proto jsou výsledky z výpočtu velice nepřesné a pouze orientační. V praxi se používá experimentu.

V následujícím textu budou uvedeny dva druhy výpočtu zpětného odpružení. [4]

### 1) Výpočet podle E. N. Mošnina

Zjevů zpevnění materiálu při deformaci za studena a rozložení zbylých napětí po uvolnění trubky je možno navrhnout způsob výpočtu zpětného odpružení, pokud jsou známy alespoň přibližné hodnoty poklesu napětí při uvolnění trubky dle vztahu (2.5)

$$R_{kon} = \frac{1}{\frac{n}{R_r + \frac{D}{2}} - m} - \frac{D}{2} \quad (2.5)$$

$R_{kon}$  - poloměr ohybu trubky po odpružení [mm]

$R_r$  - poloměr ohybu trubky, dokud působí ohýbací síly a momenty [mm]

$D$  - vnější průměr trubky před ohýbáním [mm]

$m; n$  - součinitelé, kteří zahrnují mechanické vlastnosti materiálu a tloušťku stěny trubky (lze je zjistit z tabulky pro konkrétní materiál a pro konkrétní průměr D a tloušťku stěny t)

Úpravou vzorce lze vypočítat  $R_r$ , který se používá jako rozměr pro konstrukci ohýbacího segmentu dle vztahu (2.6):

$$R_r = \frac{(R_{kon} + \frac{D}{2}) \cdot n}{1 + m \cdot (R_{kon} + \frac{D}{2})} - \frac{D}{2} \quad (2.6)$$



## 2) Výpočet podle P. W. D. Franze

Dle Franze závisí zpětné odpružení hlavně na poměru poloměru ohybu k vnějšímu průměru trubky tj.  $R/D$ , dále na materiálu trubky a u velkých poloměrů ohybu na přítláčnou sílu dle vztahu (2.7)

$$\rho = \alpha_r - \alpha_{kon} = \left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot \alpha_{kon} \quad (2.7)$$

- $\alpha_r$  - je úhel, na který byla trubka ohnuta (ve stupních), tedy úhel, na který má být trubka podle výkresu ohnuta  
 $\alpha_{kon}$  - úhel, který trubka zaujala po zpětném odpružení (ve stupních)  
 $\rho_{kon}$  - úhel odpružení (ve stupních).  
 $K$  - součinitel zpětného odpružení.

Z předchozích údajů je zřejmé, že:

- že při zvětšování poměru  $R/D$  roste i zpětné odpružení
- že trubky z oceli s vyšší mezí kluzu mají větší zpětné odpružení
- že se vzrůstajícím poměrem  $t/D$  roste i zpětné odpružení. [4]

### 2.4 Popis nejpoužívanějších způsobů ohýbání trubek za studena

„Pro trubky průměru 32 až 76 mm při ohýbání zastudena bez trnu platí tento empirický vztah mezi poměrnou tloušťkou stěny a minimálním poměrným poloměrem ohybu:

$$\text{pro } \frac{t}{D} \geq \frac{1}{10} \text{ je } R \geq 2,5D$$

$$\frac{t}{D} \geq \frac{1}{20} \text{ je } R \geq 5D.$$

Při ohýbání navíjením s pevným trnem za studena platí:

$$\text{pro } \frac{t}{D} \geq \frac{1}{10} \text{ je } R \geq 1,5D$$

$$\frac{t}{D} \geq \frac{1}{20} \text{ je } R \geq 2D$$

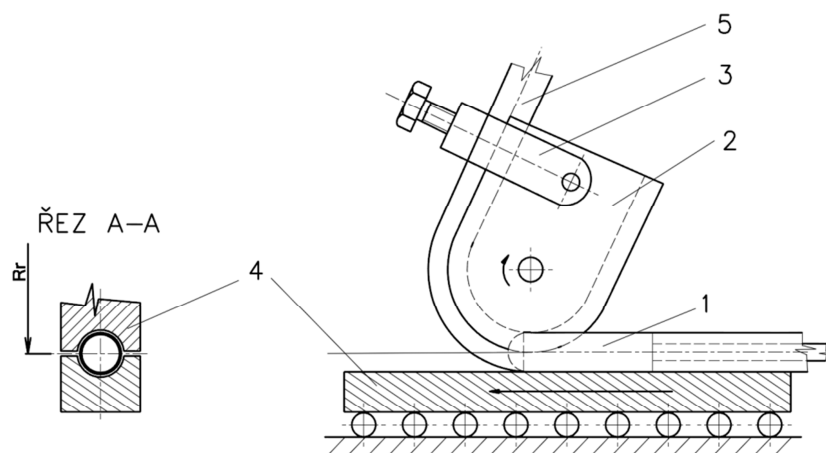
$$\frac{t}{D} \leq \frac{1}{20} \text{ je } R \geq 3D \text{“ [1]}$$

U technologií, kde si přejeme zvláštní požadavek na malé poloměry pohybů je potřeba je vyztužit proti zborcení. Např. trny, písek, plnidla.

Ohýbání za studena můžeme rozdělit na tyto 4 základní druhy:

### 2.4.1 Ohýbání trubek navíjením s opěrným trnem

Schéma tohoto způsobu ohýbání dle (obr. 18).



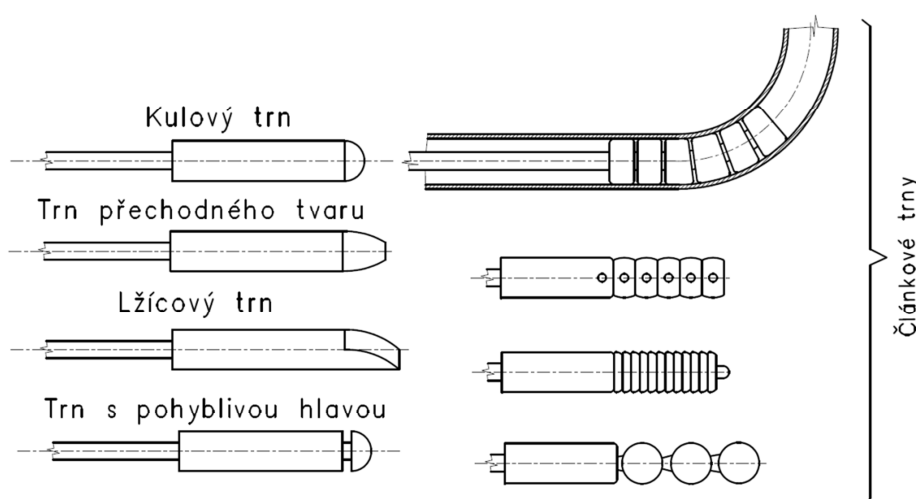
**Obr. 18 Ohýbání trnu navíjením na segment [4]**

1 – trn, 2 – segment, 3 – upínka, 4 – lišta, 5 - trubka

„Ohýbaná trubka se navleče na trn 1 a upevní k ohýbacímu segmentu 2 upínacím zařízením 3. Trn je ve směru své osy stavitelný. Je uchycený pevně v kozlíku, aby se po nastavení nemohl ve směru osy pohybovat. Při ohýbání je trubka opřena o opěrnou lištu 4.“ [4]

Ohýbací moment a moment potřebný k překonání tření se přenáší z posledního hnacího hřídele nebo kola na ohýbací segment, buď přímo prostřednictvím klínů, nebo pomocí upínacích součástí.

Trny pro ohýbání mají různou konstrukci. Od nejjednodušších až po velmi složité na výrobu jako jsou článkové trny. Na (obr. 19) je několik případů trnů.



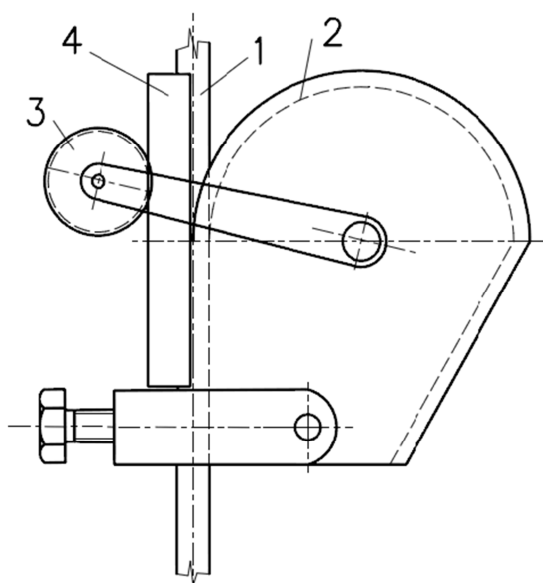
**Obr. 19 Různé druhy trnů [4]**

Tento způsob ohýbání trubek je jedním z nejrozšířenějších způsobů ohýbání trubek vůbec. Byly pro něj zkonstruovány různé stroje, lišící se velikostí a pohonem,

ale princip zůstává zachován. Různé bývá upínací zařízení, stupeň mechanizace a tvar trnu. [4]

#### 2.4.2 Ohýbání navíjením bez trnu

„Ohýbání bez trnu je z hlediska sil a momentů způsob, při kterém příčná síla, která s reakcí čepu stolu tvoří momentovou dvojici, mění vzhledem k trubce své působíště. Podle působení sil a momentů je tedy tento způsob stejný jako ohýbání s trnem, pouze zde odpadají druhotné síly vyvolané třením trnu o trubku. U tohoto způsobu se segment nepohybuje a trubka je k němu přitlačována, na rozdíl od ohýbání s opěrným trnem. (obr. 20).“ [4]



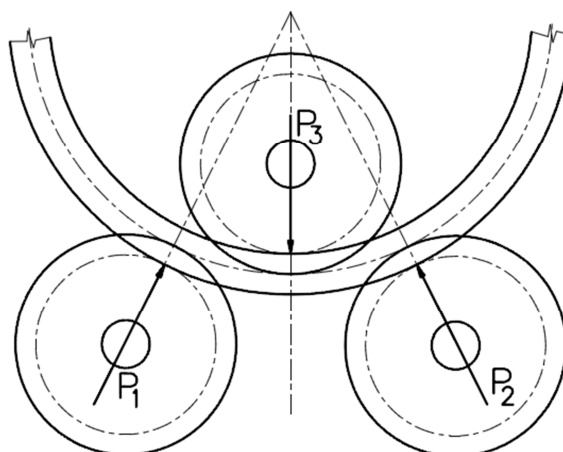
**Obr. 20 Ohýbání trubek navíjením na segment bez opěrného trnu [13]**  
1 – trubka, 2 – segment, 3 – tvarový váleček, 4 – lišta

#### 2.4.3 Ohýbání zakružováním

„Při ohýbání trubek zakružováním je ohyb způsoben momentem příčných sil  $P$ , které vzhledem k trubce mění svá působíště (obr. 21).“ [4]

Podle sil a momentů je tento způsob podobný předešlým. Má výhody i nevýhody.

Největší výhodou tohoto způsobu je ve výrobě různých poloměrů, u kterých není potřeba pro každý vyrábět různé nástroje a je možné dosáhnout úhlů  $360^\circ$  a více. Je možné vyrábět hady ve tvaru šroubovic nebo spirály. Nevýhodou je pracnější dosažení stejných poloměrů ohybu u série stejných výrobků, pokud konstrukce stroje není přímo vytvořena pro tento účel. Není možné dosáhnout tak malých poloměrů ohybů jako u navíjení s trnem nebo bez trnu, kvůli tomu, že trubka není vedena v drážce segmentu a lišty. Nejmenší poloměry ohybu jsou asi  $R=6D$ . [4]



Obr. 21 Ohýbání zakružováním [4]

#### 2.4.4 Ohýbání trubek na lisech

„Z hlediska sil a momentů je to způsob, při kterém příčná síla s reakcemi tvoří dvojice, které vytvářejí ohybový moment. Síly vzhledem k trubce nemění své působíště, pokud tvar tvárníku sám nemá vliv na změnu působíště.“ [4]

Ohýbání na lisech patří k nejstarším a velmi rozšířeným způsobům. Tento způsob ohýbání je možno rozdělit podle různých hledisek. Podle stavu materiálu zatepla a zastudena, podle tvaru buď v jedné nebo v dvou rovinách, dle výroby jednotlivé ohyby, v sériové nebo hromadné výrobě atd. Ohýbání trubek lisováním má velké výhody. Především široká použitelnost, poměrně levné a univerzální stroje, levné nástroje, vysoká produktivita práce při sériové nebo hromadné výrobě, menší spotřeba energie oproti jiným způsobům atd. Nevýhodou však je ovalita příčného řezu a větší poměrné poloměry ohybu. [4]

#### 2.5 Prodávané stroje na ohýbání trubek

Stroje na ohýbání trubek můžeme rozdělit do 4 druhů dle pracovního ústrojí:

##### 2.5.1 Manuální ohýbačky trubek:

Manuální (ruční) ohýbačky trubek jsou velmi malé přenosné stroje. Jsou vhodné k ohýbání trubek menších průměrů. Ale i přes ruční pohon disponují mechanismy jako je například hřeben, s kterým se dají ohýbat i větší rozměry s minimální silou. Výhodou je také její jednoduché ovládání. Avšak pro větší průměry nebo kovové trubky není vhodná. [5]

**Příklad:** Ruční hřebenová ohýbačka P/22A (obr. 22)



„**Použití:** pro měděné trubky průměr 6-22 mm, vícevrstvé trubky průměr 16-32 mm.“ [5].



**Obr. 22 Ruční hřebenová ohýbačka  
P/22A [5]**



**Obr. 23 Ruční hydraulická  
ohýbačka OB/85S [5]**

### **2.5.2 Manuální hydraulické ohýbačky trubek:**

Tyto ohýbačky se svou konstrukcí, velikostí a možností přenášení neliší od prvního typu ohýbaček. Jejich pohon zas zajišťuje lidská síla, ale přes hydraulický mechanismus, který je schopen vyvozovat větší síly, než je toho u hřebenového mechanismu. Ovládání je stále velice jednoduché. Ohýbačka má dlouhou životnost. Je vhodná pro trubky menších průměrů, ale už jí nedělají problém trubky z uhlíkových ocelí a ocelových trubek hydraulických rozvodů. [5]

**Příklad:** Ruční hydraulická ohýbačka OB/85S (obr. 23)

„**Použití:** pro žíhané měděné trubky do průměru 22 mm, pro instalační trubky z uhlíkové ocele do průměru 20 mm, pro ocelové trubky hydraulických rozvodů do průměru 18 mm (do tloušťky stěny 1,2 mm)“ [5]

### **2.5.3 Elektrické ohýbačky trubek**

Elektrické ohýbačky trubek používají jako pracovní médium elektrickou energii. Ohyb se děje pomocí asynchronního motoru v ohýbačce. Tyto stroje jsou velice silné a naproti manuálním ohýbačkám dokážou ohýbat až několikanásobné průměry trubek. Jejich síla je vyvozena motorem, a proto u těchto ohýbaček není potřeba žádná síla. Jejich nevýhodou je jejich horší přenosnost a větší váha. Také spotřeba elektrické energie.

**Příklad:** Elektrická ohýbačka UNI 42A s asynchronním motorem 0,75kW 230V, 50Hz, 2800 ot/min (obr. 24) [5]

**„Použití:** pro tvrdé a měkké Cu trubky do průměru 42 mm (do tloušťky stěny 1,5 mm), pro trubky pro nábytek do průměru 54 mm (do tloušťky stěny 4 mm), pro hydraulické ocelové trubky do průměru 54 mm (do tloušťky stěny 4 mm).“ [5]



Obr. 24 Elektrická ohýbačka UNI  
42A [5]



Obr. 25 Elektrohydraulická  
ohýbačka [5]

#### 2.5.4 Elektrohydraulické ohýbačky trubek

Elektrohydraulická ohýbačka spojuje elektrickou energii a hydraulický mechanismus. Je stejně jako elektrická poháněná asynchronním motorem. Ale tento motor slouží k pohánění hydraulického mechanismu, a tím pádem není potřebná lidská síla a je možné ohýbat rychleji i silnější trubky. Její přenosnost je lepší, než u čistě elektrické díky její menší váze a možnosti ohýbat trubky ne přímo na ohýbačce, ale hydraulickým kabelem o délce např. 3 metrů.

**Příklad:** Elektrohydraulická ohýbačka s asynchronním motorem 0,18 kW 230V/50Hz. (obr. 25)

**„Použití:** pro žíhané trubky do průměru 22mm (tloušťky stěny 1,5 mm), pro nerezové trubky do průměru 22 mm (tloušťka stěny 1,2mm), pro vrstvené trubky do průměru 50 mm (tloušťka stěny 4mm)“ [5]

Tyto 4 druhy ohýbaček se v dnešní době prodávají. Každý si vybere dle svého uvážení co je pro jeho firmu ideální. Dle cenové relace i dle funkčnosti. K ohýbačkám se dodává bohaté příslušenství dle přání zákazníka. Různé průměry ohybu, přesné digitální měřidla ohybu aj. Ceny ohýbaček se pohybují od nejmenších ručních ohýbaček kolem 200 Kč až po velké elektrické, které se pohybují v řadu čtvrt milionu. [6]

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem této bakalářské práce je určit z dodaných trubek jejich zpětné odpružení, které by se dalo použít v praxi pro ohýbání právě dodaných trubek od společnosti Knomi s.r.o.

#### 3.1 Charakteristika použitých materiálů

Ze společnosti Knomi s.r.o. byly dodány 4 druhy trubek různých průměrů. Ke každému průměru 11 ohnutých trubek s úhly od 10° do 120°. U trubky s průměrem 10 x 1 chyběly ohnuté hodnoty na 10° a 120°. Průměry trubek, jejich poloměry ohybu a materiály jsou:

*Trubka s průměrem a tloušťkou stěny 10 x 1, materiál 11 353, poloměr R25*

*Trubka s průměrem a tloušťkou stěny 12 x 1, materiál 11 353, poloměr R36*

*Trubka s průměrem a tloušťkou stěny 15 x 1.5, materiál 11 353, poloměr R30*

*Trubka s průměrem a tloušťkou stěny 18 x 1.5, materiál 11 353, poloměr R55*

#### Použitý materiál ČSN 41 1353

Neušlechtilá konstrukční ocel s garantovanou mezí pevností  $R_m = 350$  MPa, vhodná k výrobě bezešvých trubek, vhodná na trubkové konstrukce staticky namáhaných součástí (i svařované), potrubí pro vedení oleje, nafty, vody, páry, vzduchu, plynu, na spojovací součásti potrubí apod. Svařitelnost zaručená v závislosti na tloušťce polotovaru. [7,8]

„Alternativní normy označení této oceli:

- ČSN 41 13 53
- ČSN 411353
- ČSN 41 13 53 : 1983
- ČSN 411353:1983
- ČSN 41 1353:1983“ [9]

#### 3.2 Výsledky a průběh statické tahové zkoušky

Charakteristika materiálu 11 353 byla popsána v předchozí kapitole 3.1. Pro ověření mechanických vlastností tohoto materiálu bude použita normovaná statická zkouška tahem dle EN ISO 6892-1. [10] Měření se provedlo na trhačím stroji TIRAtest 2300 (Obr. 26).



Zkouška probíhala přímo na dodaných trubkách. Nejdříve se odřízly z trubek vhodné vzorky. Vybraly se trubky s nejdelší možnou částí vzorku, aby tahová zkouška byla co nejpřesnější. U vzorků se zploštily konce trubky, aby se mohly uchytit do upínacích čelistí pro tahovou zkoušku. Vzorky se upnuly do čelistí a proběhla tahová zkouška a výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tab. 1.

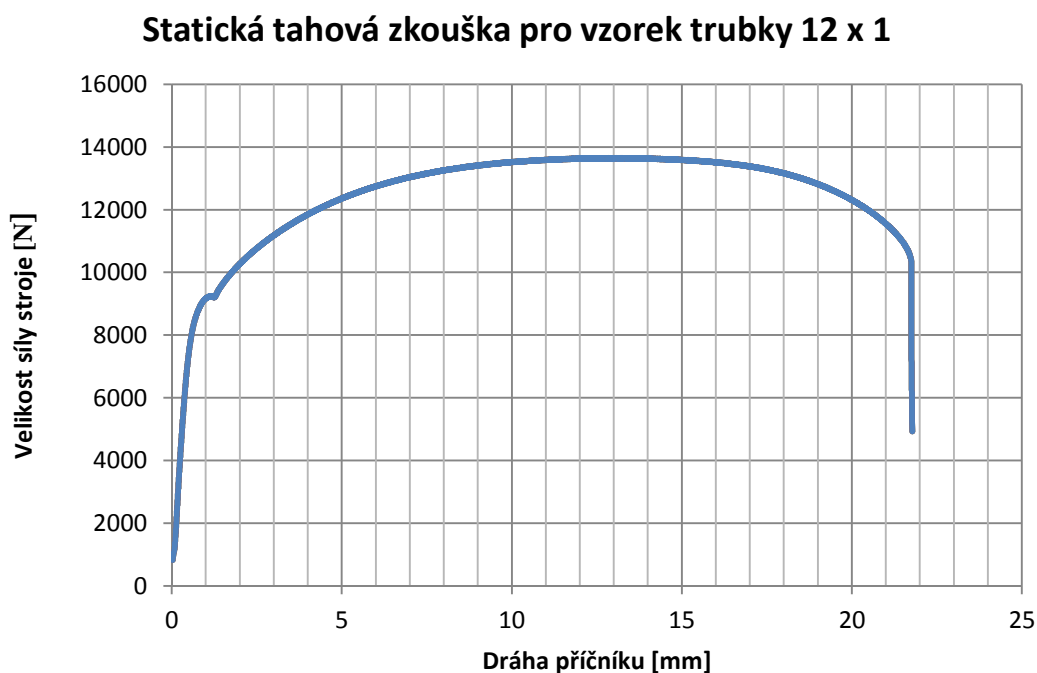
**Obr. 26** Trhačí stroj TIRAtest 2300 [11]

Tab. 1 Tabulka výsledků statické tahové zkoušky pro měřené trubky

Dodané trubky průměr[mm] x tloušťka stěny [mm]	Smluvní mez kluzu $R_{p02}$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa]
10 x 1	303	393
12 x 1	248	395
15 x 1,5	270	406
18 x 1,5	251	385
Průměrná hodnota [MPa]	268	395

Výsledky odpovídají materiálovému listu. Proto je možné pro další výpočet použít graf na určení zpětného odpružení materiálu 11 353 (obr. 34).

Na grafu (obr. 27) je průběh statické tahové zkoušky pro vzorek z trubky o průměru 12 x 1 mm. Pro ostatní zkoušky jsou průběhy podobné a není potřeba je zde udávat. Tažnost se kvůli menším délkám vzorku nepodařilo změřit.

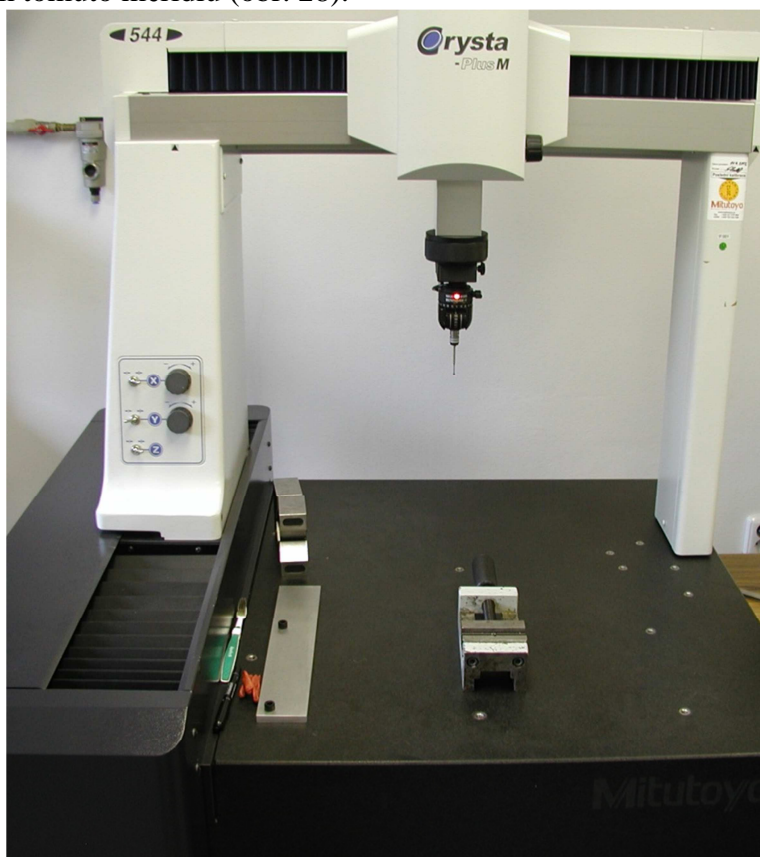


Obr. 27 Graf statické tahové zkoušky pro vzorek trubky 12 x 1

### **3.3 Měření úhlů na 3D měřidle Mitutoyo Crysta-PlusM 544**

Po zjištění materiálu trubek z předešlé kapitoly 3.2 se naměřilo jejich zpětné odpružení.

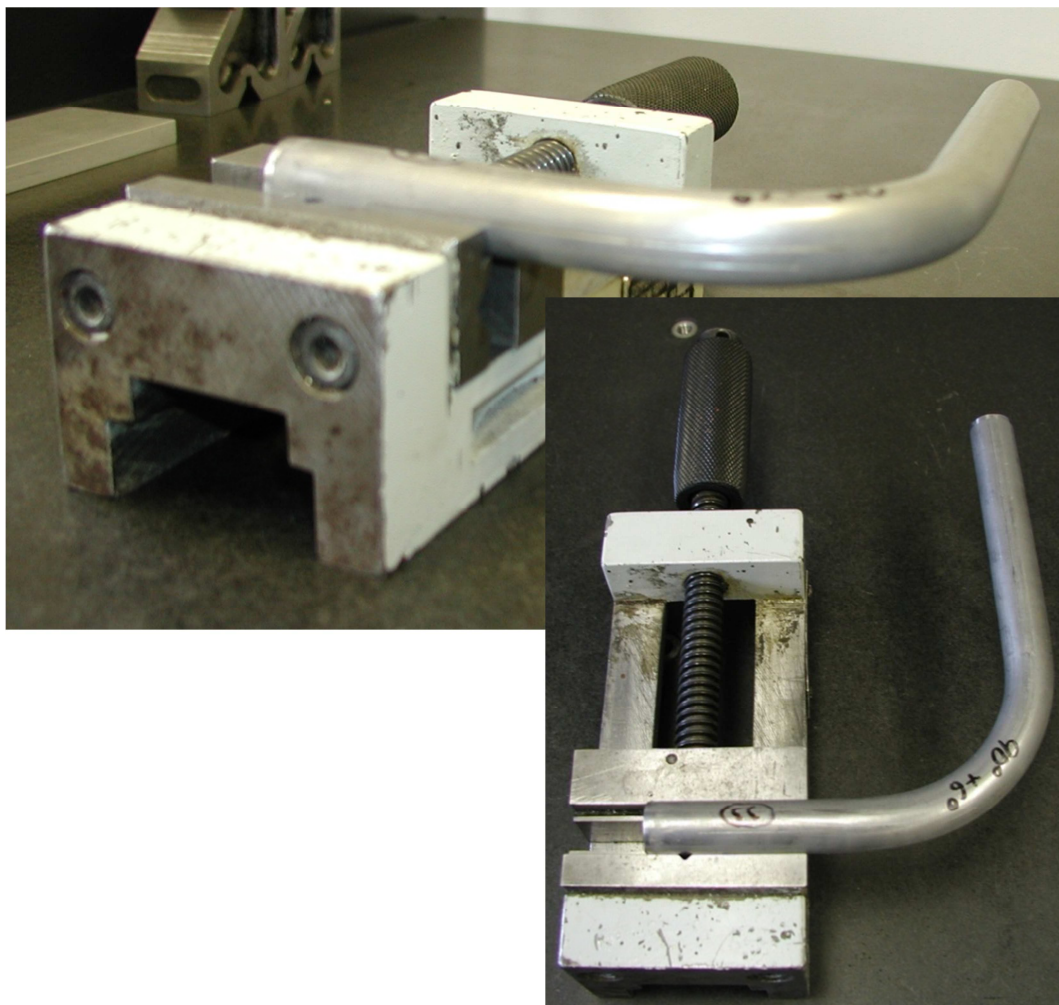
Ohnuté trubky od společnosti Knomi s.r.o. byly měřeny na 3D měřidle Mitutoyo Crysta-PlusM544 ve firmě BMTO Group a.s. Tento způsob měření byl vybrán z důvodu toho, že např. u profilografu by vznikala velká chyba, kvůli tomu, že trubky nejsou ohnuty přesně v jedné rovině. Další možnost měření byla přes Cad software. Trubky by se vyfotily a v Cad softwaru by se změřil úhel pomocí narýsovaných čar. Tento způsob je ale také nepřesný asi jako u profilografu. U 3D měřidla Mitutoyo tyto chyby odpadají. Toto měřidlo má manuální pohyb měřící hlavy a měří bodově ve třech osách. Které pak zpracuje software dodávaný firmou Mitutoyo k tomuto měřidlu (obr. 28).



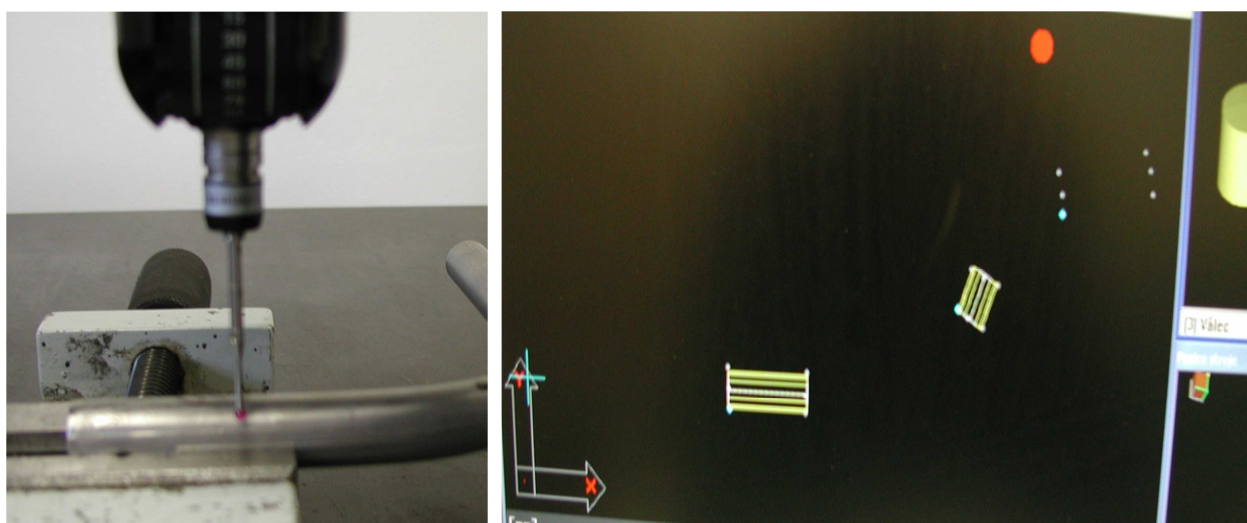
**Obr. 28 Měřidlo Mitutoyo Crysta-PlusM 544**

Vlastní měření probíhalo tak, že do svěráku byla upnuta ohnutá trubka chycena asi za polovinou průměru trubky. To je z důvodu, aby se daný průřez trubkou dal naměřit co nejpřesněji a nevznikali velké chyby měření. (obr. 29).





**Obr. 29 Upnutí trubky ve svěráku**



**Obr. 30 Samotné měření válců na trubce**

Poté na trubce byly měřeny průřezy na obou koncích trubky asi 2 [cm] od kraje, aby se předešlo měření na zploštěné části trubky. Každý průřez se měřil 3 body. Z průřezů vytvořil software dva válce. (obr. 30).

Potom co proběhlo naměření válců, software srovnal válce do jedné roviny (aby se vypočítal úhel mezi trubkou a nepočítalo se s odchylkou upnutí trubky). Vypočítal osy válců a z těch určil úhel mezi nimi a výsledek vypsál.

### **Výsledky měření:**

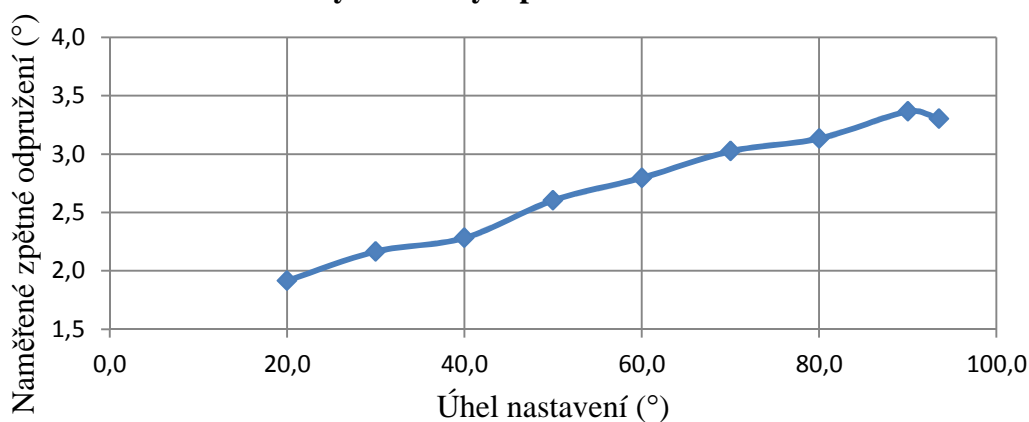
#### **1) Trubka 10 x 1, materiál 11 353, poloměr ohybu R25**

*Tab. 2 Naměřené zpětné odpružení pro dané úhly u trubky 10 x 1*

Úhel nastavení (°)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	94,0	120,0
Výsledný úhel (°)	X	18,1	27,8	37,7	47,4	57,2	67,0	76,9	86,6	90,2	X
Naměřené zpětné odpružení (°)	X	1,9	2,2	2,3	2,6	2,8	3,0	3,1	3,4	3,3	X

Výsledky měření z tab. 2 vykresleny do grafu (obr. 31).

**Velikost naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 10 x 1**



**Obr. 31 Graf velikosti naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 10 x 1**

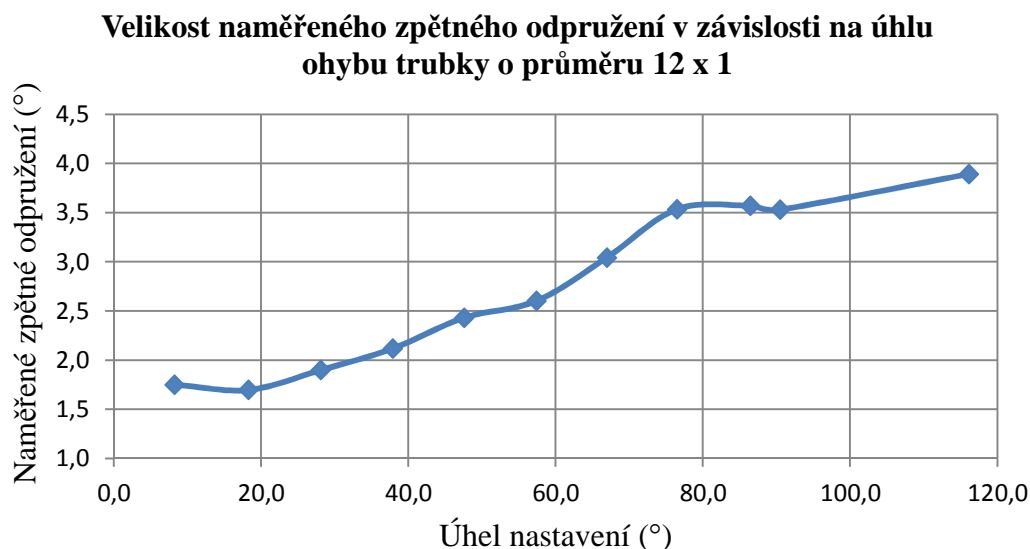
#### **2) Trubka 12x1, materiál 11 353, poloměr ohybu R36**

*Tab. 3 Naměřené zpětné odpružení pro dané úhly u trubky 12 x 1*

Úhel nastavení (°)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	94,0	120,0
Výsledný úhel (°)	8,2	18,3	28,1	37,9	47,6	57,4	67,0	76,5	86,4	90,5	116,1
Naměřené zpětné odpružení (°)	1,8	1,7	1,9	2,1	2,4	2,6	3,0	3,5	3,6	3,5	3,9



Výsledky měření z tab. 3 vykresleny do grafu (obr. 32).



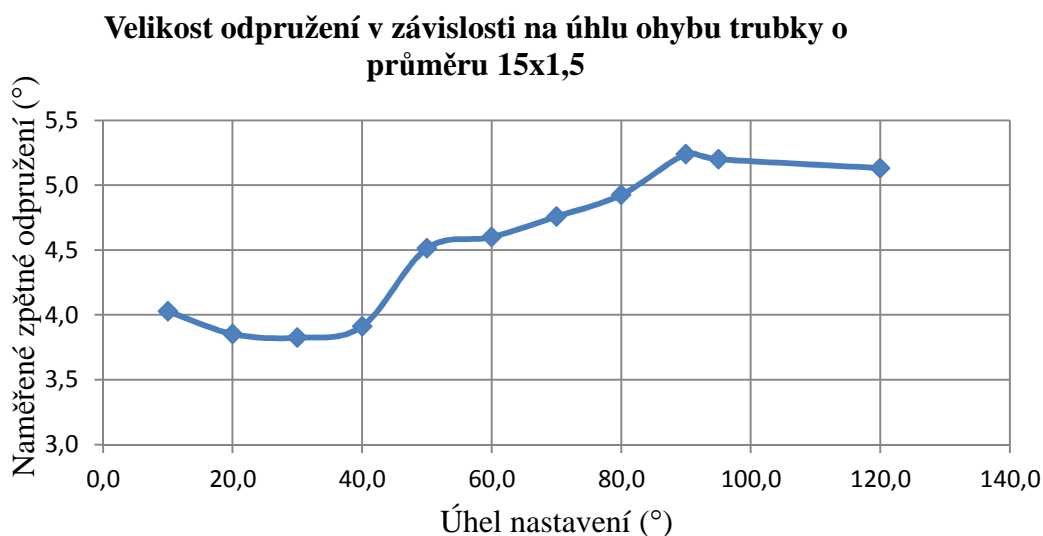
**Obr. 32 Graf velikosti naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 12 x 1**

### **3) Trubka 15x1.5, materiál 11 353, poloměr ohybu R30**

*Tab. 4 Naměřené zpětné odpružení pro dané úhly u trubky 12 x 1*

Úhel nastavení (°)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	95,0	120,0
Výsledný úhel (°)	6,0	16,1	26,2	36,1	45,5	55,4	65,2	75,1	84,8	89,8	114,9
Naměřené zpětné odpružení (°)	4,0	3,9	3,8	3,9	4,5	5,1	4,8	4,9	5,2	4,5	5,1

Výsledky měření z tab. 4 vykresleny do grafu (obr. 33).



**Obr. 33 Graf velikosti naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 10 x 1**

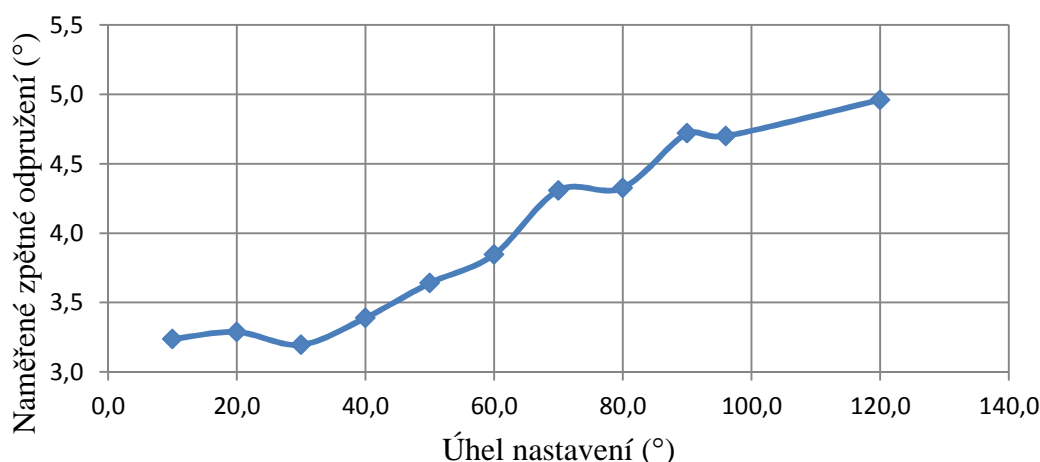
#### 4) Trubka 18x1,5, materiál 11 353, poloměr ohybu R55

Tab. 5 Naměřené zpětné odpružení pro dané úhly u trubky 18 x 1,5

Úhel nastavení (°)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	95,0	120,0
Výsledný úhel (°)	6,8	16,7	26,8	36,6	46,4	56,2	65,7	75,7	85,3	91,3	115,0
Naměřené zpětné odpružení (°)	3,2	3,3	3,2	3,4	3,6	3,8	4,3	4,3	4,7	4,7	5,0

Výsledky měření z tab. 5 vykresleny do grafu (obr. 34).

Velikost naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 18 x 1,5



Obr. 34 Graf velikosti naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 18 x 1,5

#### 3.4 Výpočet zpětného odpružení

Po naměření zpětného odpružení na měřidle, se vypočítá jeho teoretická hodnota.

Pro výpočet zpětného odpružení byl vybrán způsob podle W. D. Franze, který je popsán v teorii v kapitole 2.3.3. Pro výpočet byl použit vzorec od tohoto autora (3.1):

$$\rho = \alpha_r - \alpha_{kon} = \left( \frac{1}{K} - 1 \right) \cdot \alpha_{kon} \quad (3.1)$$

$\alpha_r$  - je úhel, na který byla trubka ohnuta (ve stupních), tedy úhel, na který má být trubka podle výkresu ohnuta

$\alpha_{kon}$  - úhel, který trubka zaujala po zpětném odpružení (ve stupních)

$\rho_{kon}$  - úhel odpružení (ve stupních)

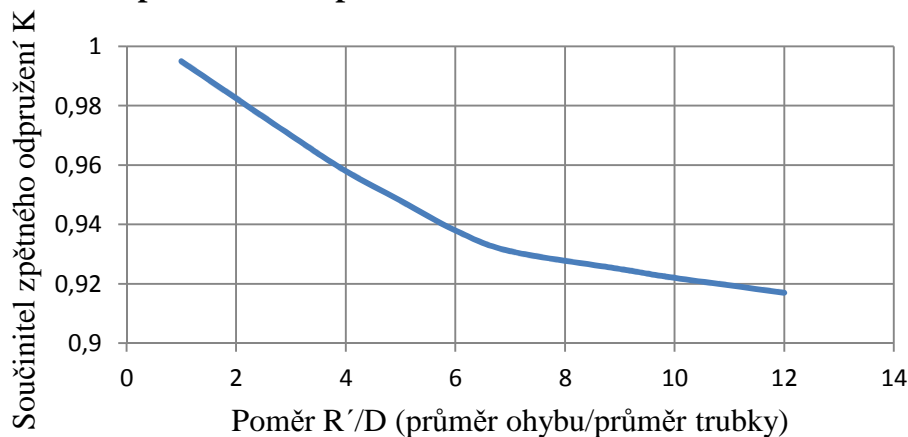
$K$  - součinitel zpětného odpružení.

Pro výpočet použijeme pravou a levou stranu rovnice (3.2)

$$\rho = \left( \frac{1}{K} - 1 \right) \cdot \alpha_{kon} \quad (3.2)$$

a součinitel zpětného odpružení  $K$  vyčteme z grafu závislosti součinitele zpětného odpružení  $K$  na poměru  $R'/D$  pro ocel obdobnou ČSN 11 353 (obr. 35).

**Závislost součinitele zpětného odpružení  $K$  na  
poměru  $R'/D$  pro ocel obdobnou ČSN 11 353**



**Obr. 35 Graf závislosti zpětného odpružení  $K$  na poměru  $R'/D$  pro ocel obdobnou ČSN 11 353 [1]**

Pro dodané trubky vycházejí součinitele přibližně dle tab. 6:

*Tab. 6 Součinitele zpětného odpružení pro dané trubky*

Dodané trubky + poloměr ohybu $R$	Poměr $R'/D$	Součinitel zpětného odpružení $K$
10 x 1, R25	5	0,95
12 x 1, R36	6	0,94
15 x 1,5, R30	4	0,96
18 x 1,5, R55	6,1	0,935

Poměr  $R'/D$  jsme spočítali z dodaných trubek.  $R'$  je průměr ohybu, takže platí:  $R' = 2R$ . A pak je možné z grafu odhadnout přibližné hodnoty zpětného odpružení  $K$ .

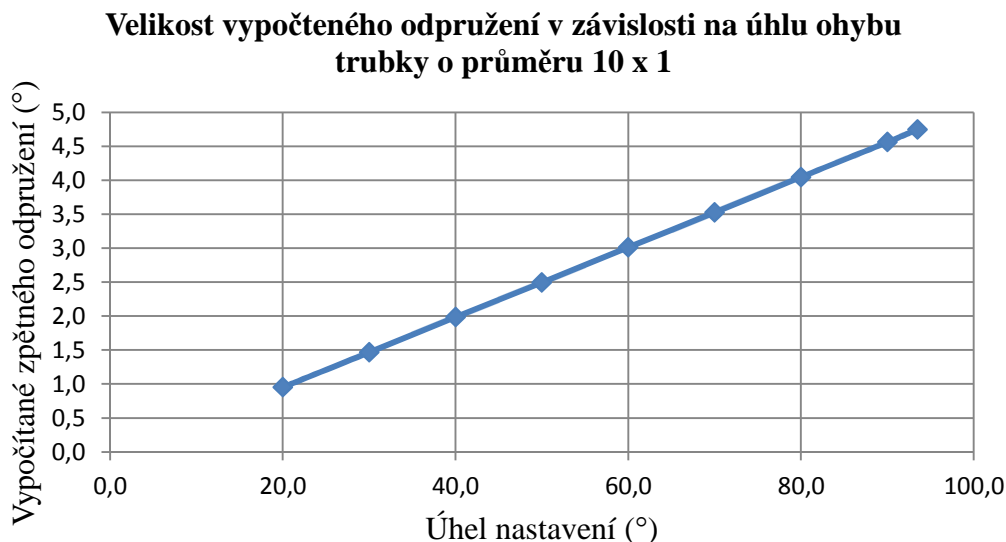
Ted' můžeme dle naměřeného úhlu spočítat zpětné odpružení ze vzorce (3.2):

**1) Trubka 10x1, materiál 11 353, poloměr ohybu R25**

*Tab. 7 Vypočítané zpětné odpružení pro dané úhly u trubky 10 x 1*

Úhel nastavení (°)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	93,5	120,0
Výsledný úhel (°)	X	18,1	27,8	37,7	47,4	57,2	67,0	76,9	86,6	90,2	X
Početní výsledky zpětného odpružení (°)	X	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,6	4,7	X

Výsledky výpočtu z tab. 7 vykresleny do grafu (obr. 36).



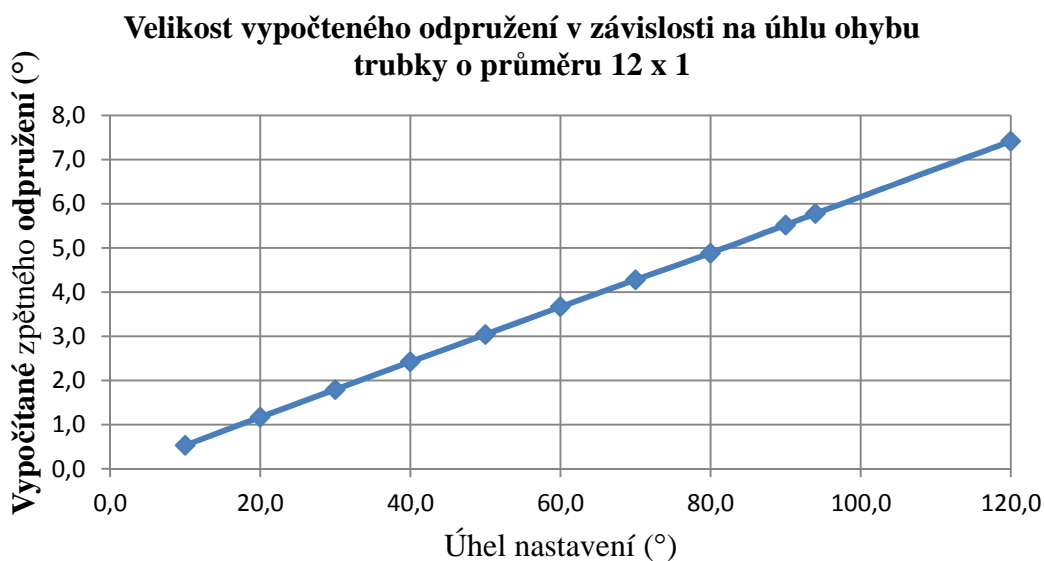
**Obr. 36 Graf velikosti vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu  
trubky o průměru 10 x 1**

**2) Trubka 12x1, materiál 11 353, poloměr ohybu R36**

*Tab. 8 Vypočítané zpětné odpružení pro dané úhly u trubky 12 x 1*

Úhel nastavení (°)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	94,0	120,0
Výsledný úhel (°)	8,2	18,3	28,1	37,9	47,6	57,4	67,0	76,5	86,4	90,5	116,1
Početní výsledky zpětného odpružení (°)	0,5	1,2	1,8	2,4	3,0	3,7	4,3	4,9	5,5	5,8	7,4

Výsledky výpočtu z tab. 8 vykresleny do grafu (obr. 37).



**Obr. 37 Graf velikosti vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky  
o průměru 12 x 1**

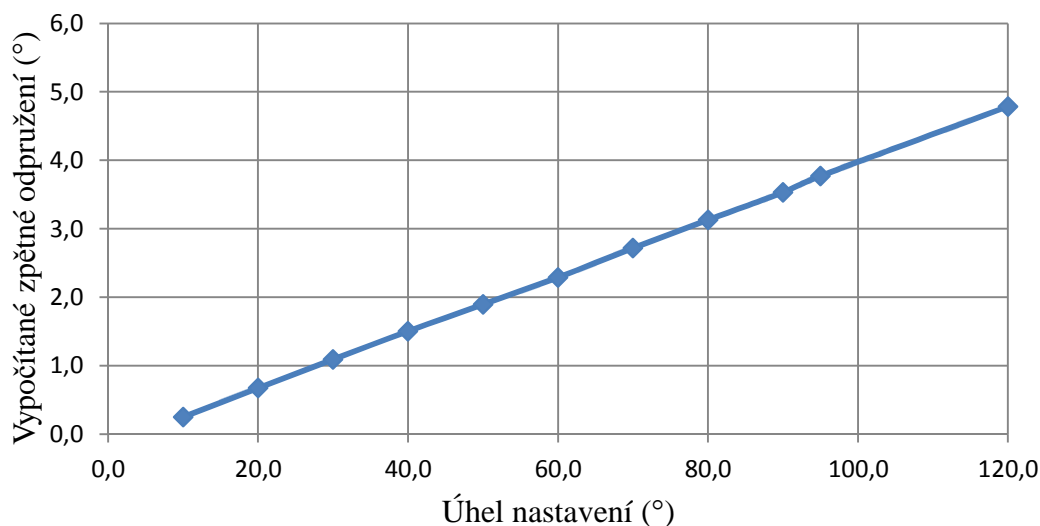
### 3) Trubka 15x1.5, materiál 11 353, poloměr ohybu R30

Tab. 9 Vypočítané zpětné odpružení pro dané úhly u trubky 18 x 1,5

Úhel nastavení (°)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	95,0	120,0
Výsledný úhel (°)	6,0	16,1	26,2	36,1	45,5	54,9	65,2	75,1	84,8	90,5	114,9
Početní výsledky zpětného odpružení (°)	0,2	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,8	4,8

Výsledky výpočtu z tab. 9 vykresleny do grafu (obr. 38).

**Velikost vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 15 x 1,5**



**Obr. 38 Graf velikosti vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 15 x 1,5**

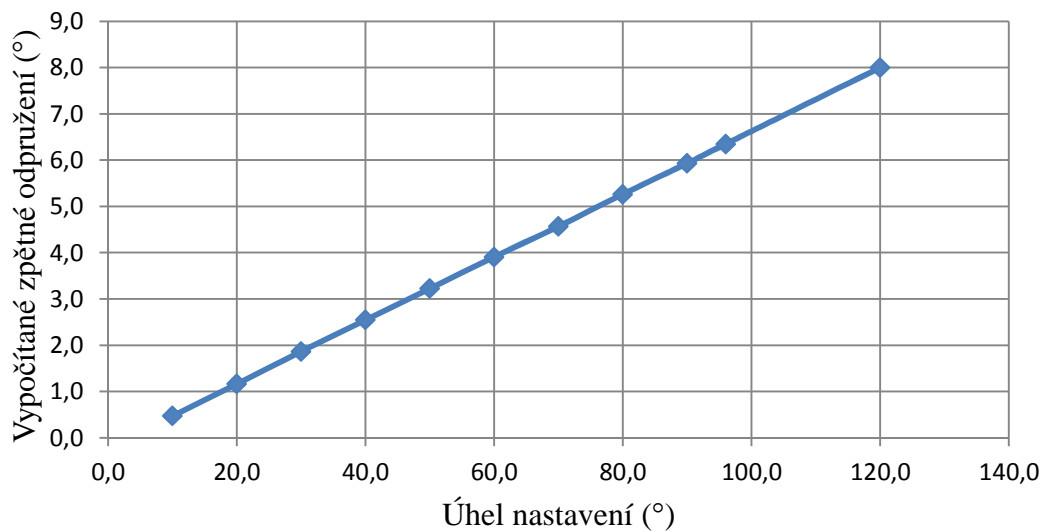
### 4) Trubka 18x1.5, materiál 11 353, poloměr ohybu R55

Tab. 10 Vypočítané zpětné odpružení pro dané úhly u trubky 18 x 1,5

Úhel nastavení (°)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	96,0	120,0
Výsledný úhel (°)	6,8	16,7	26,8	36,6	46,4	56,2	65,7	75,7	85,3	91,3	115,0
Početní výsledky zpětného odpružení (°)	0,5	1,2	1,9	2,5	3,2	3,9	4,6	5,3	5,9	6,3	8,0

Výsledky výpočtu z tab. 10 vykresleny do grafu (obr. 39).

**Velikost vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu  
trubky o průměru 18 x 1,5**



**Obr. 39 Graf velikosti vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu  
trubky o průměru 18 x 1,5**

## 4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

### 4.1 Zpracování výsledků do grafu a diskuse k výsledkům

Ze společnosti Knomi s.r.o. byly dodány 4 druhy trubek různých průměrů. Ke každému průměru 11 ohnutých trubek s úhly od  $10^\circ$  do  $120^\circ$ . U trubky s průměrem  $10 \times 1$  chyběli ohnuté hodnoty na  $10^\circ$  a  $120^\circ$ . Průměry trubek, jejich poloměry ohybu a materiály jsou:

*Trubka s průměrem a tloušťkou stěny  $10 \times 1$ , materiál 11 353, poloměr R25*

*Trubka s průměrem a tloušťkou stěny  $12 \times 1$ , materiál 11 353, poloměr R36*

*Trubka s průměrem a tloušťkou stěny  $15 \times 1.5$ , materiál 11 353, poloměr R30*

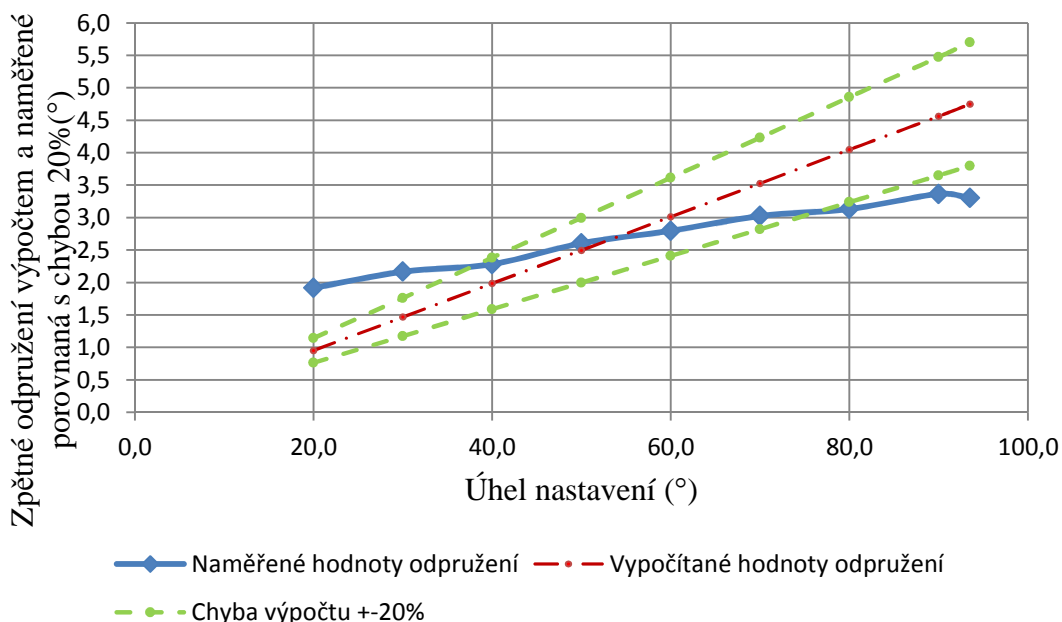
*Trubka s průměrem a tloušťkou stěny  $18 \times 1.5$ , materiál 11 353, poloměr R55*

Pro každou trubku se porovnávají do grafu početní a naměřené výsledky. Početním výsledkům se přidává chyba  $\pm 20\%$ . Tato chyba je vysoká, ale zpětné odpružení závisí na spoustě parametrů, jako např. tloušťka stěny, zploštění nebo vydutí trubky, rozmezí tolerance pevnosti materiálu, nástroje pro ohýbání atp., které se mohou v průběhu měnit, a proto tak vysoké rozmezí.

#### 1) Trubka $10 \times 1$ , materiál 11 353, poloměr ohybu R25

Zhodnocení výsledků měření a výpočtů do grafu (Obr. 40).

**Velikost odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru  $10 \times 1$**



**Obr. 40 Graf velikosti odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru  $10 \times 1$**

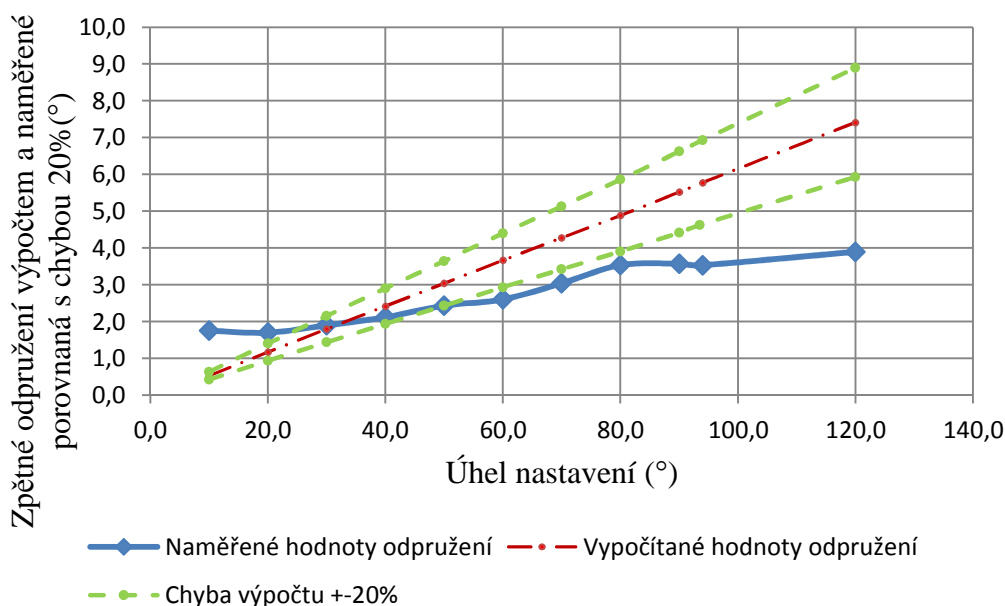
U první trubky o průměru  $10 \times 1$  je vidět, že jak vypočtené hodnoty, tak naměřené hodnoty stoupají lineárně. Vypočtené hodnoty stoupají ale rychleji. Pokud se bude brát v úvahu chyba  $\pm 20\%$ , tak úhly přibližně od  $40^\circ$  do  $80^\circ$  jsou v rozmezí a

výpočet na ně sedí nejlépe. Úhly od 20° do 40° a nad 80° do 120° jsou už velmi nepřesné a výpočtům nelze dávat vysokou vypovídající hodnotu. Velikost hodnot odpružení naměřených hodnot začíná kolem 1,9° u ohybu na 20° a roste přibližně do 3,3° u ohybu na 93,5° dle tab. 2. U vypočtených hodnot roste odpružení od 1° u ohybu na 20° do přibližně 4,7° u ohybu na 93,5° dle tab. 5. Z grafu je zřejmé, že krajní hodnoty výpočtu neodpovídají realitě.

## **2) Trubka 12x1, materiál 11 353, poloměr ohybu R36**

Zhodnocení výsledků měření a výpočtů do grafu (Obr. 41).

### **Velikost odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 12 x 1**



**Obr. 41 Graf velikosti odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 12 x 1**

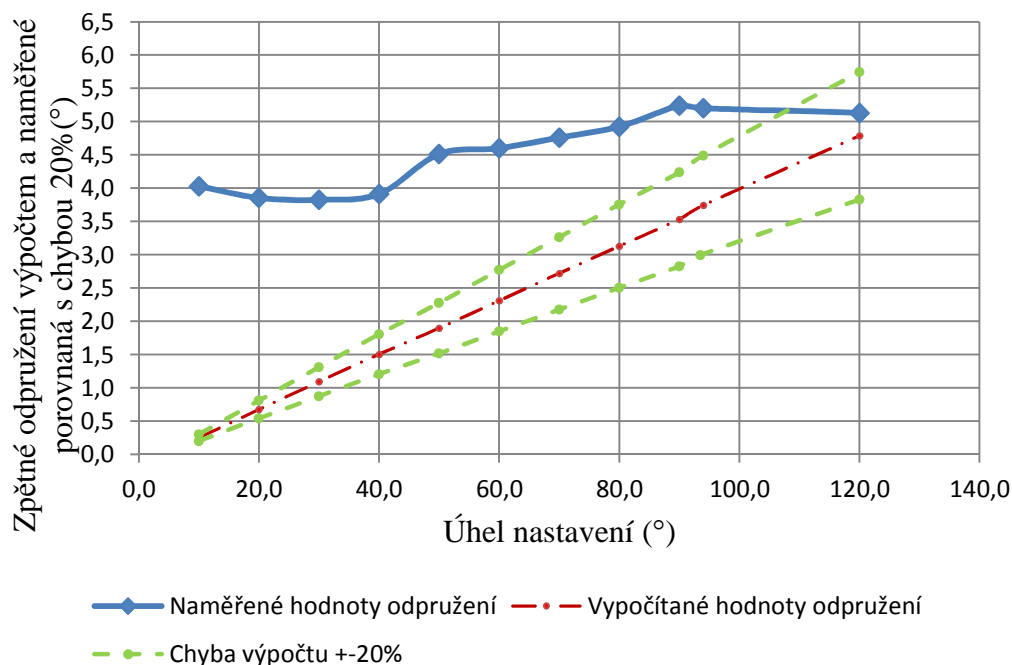
U druhé trubky o průměru 12 x 1 jsou vidět podobné výsledky. Naměřené hodnoty zase lineárně stoupají, stejně tak jako vypočtené. Vypočtené hodnoty stoupají rychleji a stejně jako u prvního grafu je zanesena chyba  $\pm 20\%$ . Porovnáním výsledků zjistíme, že výsledky se shodují s odpovídající chybou přibližně od 20° do 80°, když přihlídneme k tomu, že graf naměřených hodnot téměř kopíruje křivku chyby. Od 10° do 20° a nad 80° do 120° jsou výsledky výpočtů zase velmi nepřesné a mají malou vypovídající hodnotu. Naměřené hodnoty rostou od přibližně 1,8° u ohybu na 20° do 3,9° u ohybu na 120° dle tab. 3. Vypočtené hodnoty rostou rychleji od 0,5° u ohybu na 20° do 7,4° u ohybu na 120° dle tab. 8. Z grafu je zřejmé, že krajní hodnoty výpočtu neodpovídají realitě stejně jako u první trubky.



### 3) Trubka 15x1,5, materiál 11 353, poloměr ohybu R30

Zhodnocení výsledků měření a výpočtů do grafu (Obr. 42).

#### Velikost odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 15 x 1,5



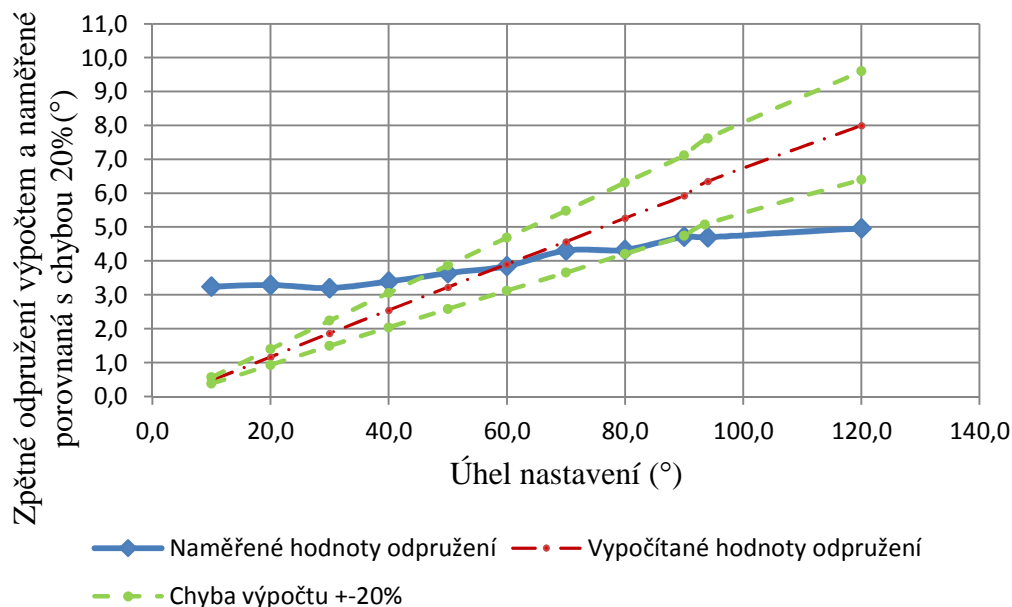
**Obr. 42 Graf velikosti odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 15 x 1,5**

U třetí trubky s průměrem 15 x 1,5 je vidět podobná charakteristika stoupání lineárních křivek. Naměřené hodnoty mají lineární průběh, stejně tak i vypočtené, ty však stoupají rychleji. Porovnáním vidíme, že naměřené hodnoty nezasahují do vypočtených. A výpočty zde jsou velice nepřesné. Měření neodpovídá očekávání dle vypočtených hodnot. Naměřené hodnoty rostou od přibližně 4° u ohybu na 10° do 5,1° u ohybu na 120° dle tab. 4. Vypočtené hodnoty rostou rychleji od 0,2° u ohybu na 10° do 4,8° u ohybu na 120° dle tab. 9. Částečná chyba bude z důvodu měnících se parametrů úhlu zpětného odpružení. Největší chyba bude nejspíše způsobena tloušťkou stěny, která dává menší poměr, než je tomu u čtvrté trubky, a tím roste zpětné odpružení.

#### 4) Trubka 18x1,5, materiál 11 353, poloměr ohybu R55

Zhodnocení výsledků měření a výpočtů do grafu (Obr. 43).

##### Velikost odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 18 x 1,5



**Obr. 43 Graf velikosti odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 18 x 1**

U čtvrté trubky o průměru 18 x 1,5 jsou vidět podobné výsledky jako u předchozích trubek. Naměřené hodnoty stoupají lineárně. Vypočtené hodnoty stoupají zase mnohem rychleji. Budeme-li předpokládat chybu  $\pm 20\%$  u výpočtu. Tak od přibližně od  $40^\circ$  do  $95^\circ$  jsou výsledky v rozmezí a výpočet se shoduje. Od  $10^\circ$  do  $40^\circ$  a nad  $95^\circ$  do  $120^\circ$  jsou výsledky měření s výpočty velmi nepřesné a nelze jim přikládat vysokou vypovídající hodnotu. Naměřené hodnoty se pohybují přibližně od  $3,2^\circ$  u ohybu na  $10^\circ$  do  $5^\circ$  u ohybu na  $120^\circ$  dle tab. 5. Vypočtené hodnoty se pohybují přibližně od  $0,5^\circ$  u ohybu na  $10^\circ$  do  $8^\circ$  u ohybu na  $120^\circ$  dle tab. 10. Z grafu je zřejmé, že krajní hodnoty výpočtu neodpovídají realitě stejně jako u prvních dvou trubek.

Celkově je zřejmé, že čím větší je poměr  $\frac{R}{D}$  tím více roste zpětné odpružení. U našich trubek jsou rozdíly jen malé, z důvodu podobného poměru. A rovněž při vzrůstajícím  $\frac{t}{D}$  roste i zpětné odpružení.

#### 4.2 Návrh ideálního přehybu trubek

Pro návrh ideálních přehybů trubek byly použity naměřené hodnoty úhlů odpružení trubek. Z důvodu, že odpovídají prakticky naměřeným hodnotám. Vypočítáme reálný součinitel  $K$  obracenným způsobem výpočtu ze vzorce (4.1):

$$\rho = \left( \frac{1}{K} - 1 \right) \cdot \alpha_{kon} \quad (4.1)$$

po úpravě (4.2):

$$K = \left( \frac{1}{\frac{\rho}{\alpha_{kon}} + 1} \right) \quad (4.2)$$

Dosadíme do vzorce (4.2) každou z hodnot pro všechny úhly a výsledkem je graf změny součinitele zpětného odpružení K dle úhlu nastavení.

Pokud známe tento součinitel není problém vypočítat ideální úhly přehybu, aby se nám trubka odpružila na námi požadovaný úhel ohybu dle vzorce (4.3):

$$\rho = \left( \frac{1}{K} - 1 \right) \cdot \alpha_{kon} \quad (4.3)$$

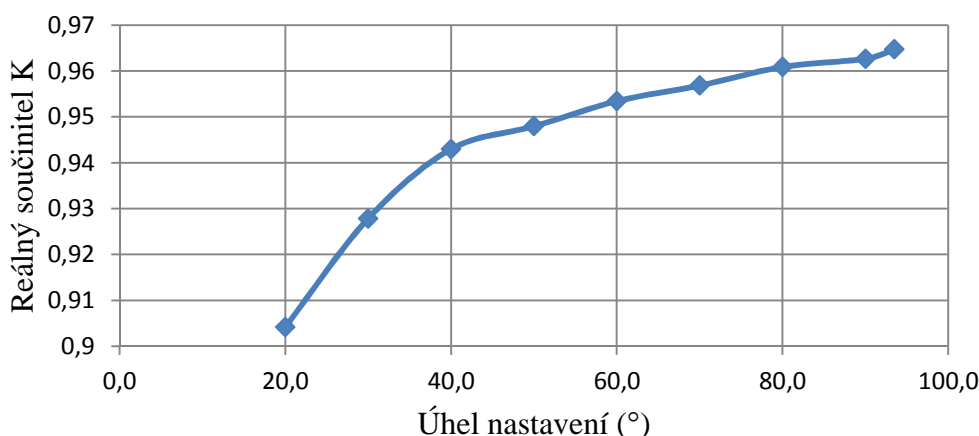
Kde za  $\alpha_{kon}$  byl dosazen již přesný úhel, na který je potřeba trubku ohnout a za K měnící se součinitel dle prvního grafu. Tím se získá graf, který ukazuje o kolik je potřeba trubku přehnout kvůli zpětnému odpružení, aby bylo dosaženo přesného úhlu ohybu.

Zde jsou uvedeny výsledky pro jednotlivé trubky:

### **1) Trubka 10 x 1, materiál 11 353, poloměr ohybu R25**

Reálný součinitel odpružení K pro hodnoty úhlů jsou zakresleny v grafu (obr. 44).

**Změna součinitele zpětného odpružení K dle úhlu nastavení pro trubku 10 x 1**

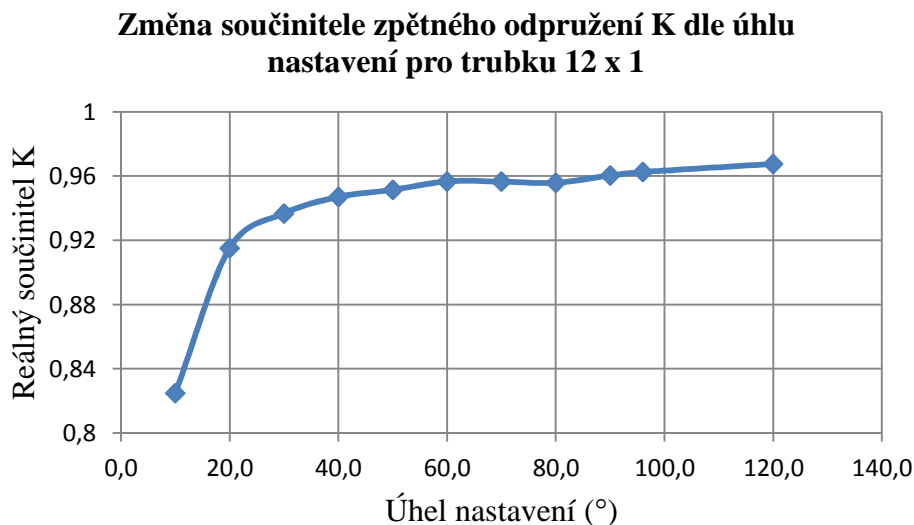


**Obr. 44 Graf změny součinitele zpětného odpružení K dle úhlu nastavení pro trubku 10 x 1**

Z prvního grafu (obr. 43) je zřejmé, že součinitel K roste první rychleji a pak se zpomalí. Jeho průměrná hodnota přibližně odpovídá zjištěným hodnotám z grafu (obr. 34)  $K=0,95$ .

## **2) Trubka 12 x 1, materiál 11 353, poloměr ohybu R36**

Reálný součinitel odpružení K pro hodnoty úhlů jsou zakresleny v grafu (obr. 45).

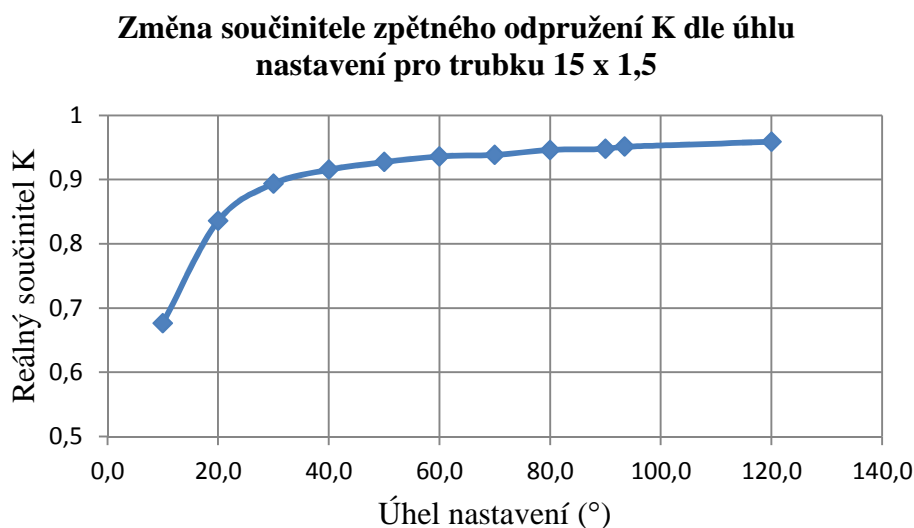


**Obr. 45 Graf změny součinitele zpětného odpružení K dle úhlu nastavení pro  
trubku 12 x 1**

U druhé trubky má graf součinitele K (Obr. 44) podobný růst jako u první. Jeho průměrná hodnota zde bude kolem 0,94 až 0,95. I když podle grafu, který se dál ustálí, by bylo lepší zvolit 0,95. Hodnota o 10° vybočuje z téměř konstantní křivky. Dle výpočtového grafu (obr. 34) hodnota 0,94 odpovídá poměrně přesně.

## **3) Trubka 15 x 1,5, materiál 11 353, poloměr ohybu R30**

Reálný součinitel odpružení K pro hodnoty úhlů jsou zakresleny v grafu (obr. 46).

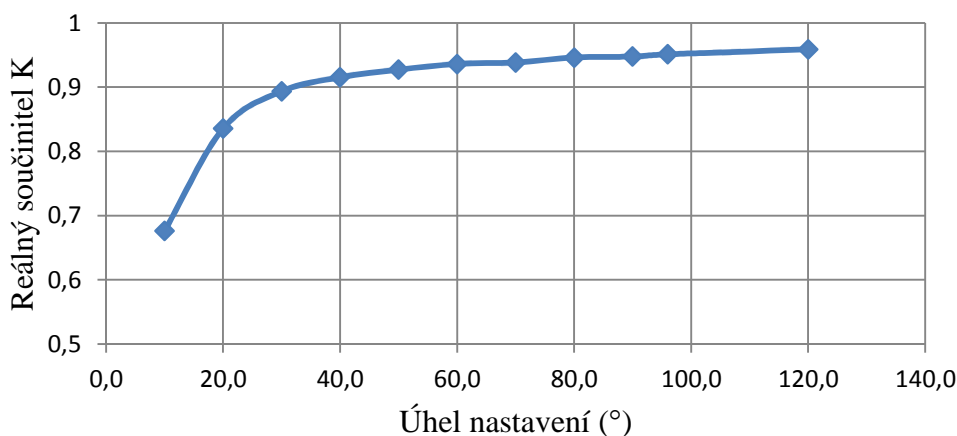


**Obr. 46 Graf změny součinitele zpětného odpružení K dle úhlu nastavení pro  
trubku 15 x 1,5**

U třetí trubky první dvě hodnoty  $K$  úplně vybočují z grafu a jsou nesmyslné. Z ostatních hodnot, lze posoudit, že součinitel  $K$  vychází kolem 0,96, což odpovídá i výpočtové hodnotě.

#### **4) Trubka 18x1,5, materiál 11 353, poloměr ohybu R55**

**Změna součinitele zpětného odpružení  $K$  dle úhlu nastavení pro trubku 18 x 1,5**



**Obr. 47 Graf změny součinitele zpětného odpružení  $K$  dle úhlu nastavení pro trubku 18 x 1,5**

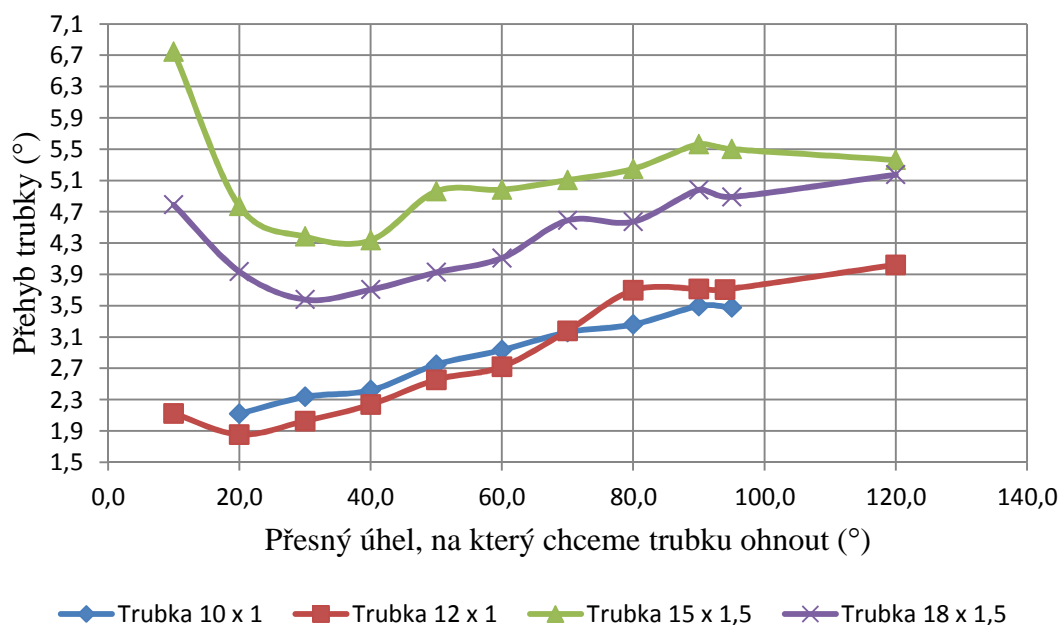
U poslední trubky u grafu (obr. 47) součinitele  $K$  vidíme, že zase první dvě hodnoty vybočují z řady. Poslední hodnoty dávají průměr kolem 0,93 až 0,94 což odpovídá výpočtové hodnotě.

Pokud výsledky shrneme celkově, je patrné, že součinitel odpružení  $K$  se blíží konstantní hodnotě jak je tomu u výpočtů. Největším problémem jsou ohyby na malé úhly do  $30^\circ$ , kde rozsahy výpočtu nesedí, a tím pádem  $K$  není konstantní. Platí zde jiná charakteristika. Pro podrobnější výsledky by bylo potřeba naměřit více trubek.

### **Přehyby všech čtyř trubek shrnutý do grafu**

Získané výsledky přehybu 4 dodaných druhů trubek jsou uvedeny v jednom grafu (obr. 48).

#### **Velikost přehybu trubky, aby se odpružila na požadovaný úhel ohybu**



**Obr. 48 Výsledné velikosti přehybu trubky pro všechny trubky**

Graf (obr. 48) nám ukazuje, o kolik musíme trubku přehnout, abychom dostali námi požadovaný úhel ohybu trubky. V grafu jsou zaznamenány všechny 4 průměry trubek. U trubek s tloušťkou stěny 1,5 mm vybočují první dvě hodnoty z řady. Tyto hodnoty jsou nejspíše nesmyslné a potřebovalo by se ohnout a změřit více trubek pro více informací. Trubky s větší tloušťkou stěny  $t = 1,5$  mají větší zpětné odpružení. Jinak všechny grafy stoupají lineárně, jak se předpokládalo a po praktické zkoušce by bylo možné používat tyto přehyby na strojích.



## 5. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zjištění ideálních přehybů trubek, aby se po odpružení vrátily na daný úhel, který požaduje výroba. Zpracování dodaných trubek proběhlo měřením a početně. Výsledky se porovnály a zhodnotily do grafů, aby bylo jasně zřetelné, kde se shodují a kde se naopak výpočty liší od naměřených hodnot. Po vyhodnocení naměřených a spočítaných hodnot je patrné, že výpočty jsou velice nepřesné a odpovídají jen v určitém rozmezí úhlů ohybu. Kromě trubky o průměru  $15 \times 1,5$  mm se výsledky výpočtu a měření přibližují od  $30^\circ$  do  $80^\circ$ . Nepřesné výsledky výpočtu má za následek příliš obecný vzorec, který přesně nezahrnuje měnící se podmínky při ohybu. Nezahrnuje různý poměr tloušťky stěn s průměrem trubky, zpevnění trubky při ohýbání a její změny tloušťky stěn, její zploštění nebo vydutí. Dále chybu nástroje a stroje na ohýbání, různorodost materiálu. To je mnoho vlivů, které mají vliv na vypočítané hodnoty. Experimentálně získané hodnoty odpružení výše uvedené vlivy a podmínky zahrnují a lze říci, že tyto hodnoty jsou přesnější. Pro navržení přehybu trubek je tedy vhodné postupovat od naměřených hodnot, ze kterých se vypočítá odpovídající součinitel  $K$ , (měnící se dle úhlu) a z něho teprve navrhnout přesné přehyby trubek tak, aby zpětné odpružení bylo stejně velké jako přehyb trubky a trubka se vrátila na požadovaný úhel ohybu. Tyto výsledky přesně odpovídají realitě, ale pro přesnější grafy by bylo potřeba získat více vzorků trubek a vytvořit komplexní hodnocení. Je vidět, že nejhůř vycházejí v měření malé úhly do  $20^\circ$  u trubek s tloušťkou stěny 1,5 mm, které přesně nezapadají do lineární charakteristiky zpětného odpružení. Tyto úhly byly nejspíše nepřesně ohnuty. Ideálně by se pro každou trubku mělo naměřit několik úhlů a zjistit hodnoty nevybočující ze statistické řady. Jinak všechny grafy stoupají lineárně, jak vyšlo ve výpočtech a po praktické zkoušce by bylo možné používat tyto přehyby na strojích.



## **SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

[1] KATALOG KNOMI S.R.O. + SHRUTÍ NOVINEK SPOLEČNOSTI [online]. 2010, [2013-03-19], 6 vydání

Dostupné: <http://shop.knomi.cz/www/katalog/katalog.pdf>

[2] KNOMI S.R.O. [online]. 2012, [2013-03-19]

Dostupné: <http://www.knomi.cz/>

[3] E-SHOP KNOMI S.R.O. [online]. 2013, [2013-03-19]

Dostupné: <http://shop.knomi.cz/>

[4] VÍTEK, A. *Ohýbání trubek*. První. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 162 s, ISBN 04-211-66.

[5] RKM Servis s.r.o. [online]. 2009, [2013-04-05]

Dostupné: [http://www.rkmservis.cz/content/ohybacky\\_trubek.php](http://www.rkmservis.cz/content/ohybacky_trubek.php)

[6] HERUEKA [online]. 2013, [2013-04-05]

Dostupné: <http://www.heureka.cz/>

[7] LEINVEBER, J., VÁVRA, P., *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.

[8] FEROMAT-HUTNÍ A SPOJOVACÍ MATERIÁL [online]. 2010, [2013-04-29]

Dostupné: [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)

[9] TECHNICKÉ NORMY [online]. 2013, [2013-04-29]

Dostupné: <http://shop.normy.biz/detail/27316>

[10] EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem: Zkušební metoda za okolní teploty*. Praha, 2002.

[11] TUL Katedra strojírenské technologie, oddělení tváření a kovů [online]. 2005, [2013-05-03]

Dostupné: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/kovy/kovy.htm>

[12] Kalibrační list 3D Mitutoyo Crysta-PlusM 544, 5 s, číslo: 1204\_MCZ2-012, vydáno 11. 04. 2013





## **SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Logo Knomi s.r.o. ....	9
Obr. 2 Křížová spojka vyráběná společností Knomi s.r.o. ....	9
Obr. 3 Ohýbání pouhým momentem.....	11
Obr. 4 Ohýbání příčnou silou.....	12
Obr. 5 Ohýbání na trnu navíjením na segment .....	13
Obr. 6 Ohýbání bez trnu navíjením na segment.....	13
Obr. 7 Ohýbání zakružováním .....	14
Obr. 8 Ohýbání vytlačováním .....	14
Obr. 9 Výroba kolen na tvarovém trnu .....	15
Obr. 10 Záhybový ohyb .....	15
Obr. 11 Zploštěný tvar příčného řezu trubkou .....	16
Obr. 12 Vydutý tvar příčného řezu trubkou .....	16
Obr. 13 Řez ohnutou trubkou.....	17
Obr. 14 Rozložení napětí při pružné deformaci v ohýbané trubce .....	18
Obr. 15 Rozdělení napětí v plasticky deformované trubce při ohýbání.....	18
Obr. 16 Zbylá napětí v trubce ohýbané zastudena po zhotoveném ohybu po zpětném odpružení.....	19
Obr. 17 Zpětné odpružení .....	19
Obr. 18 Ohýbání trnu navíjením na segment .....	22
Obr. 19 Různé druhy trnů.....	22
Obr. 20 Ohýbání trubek navíjením na segment bez opěrného trnu.....	23
Obr. 21 Ohýbání zakružováním .....	24
Obr. 22 Ruční hřebenová ohýbačka P/22A.....	25
Obr. 23 Ruční hydraulická ohýbačka OB/85S.....	25
Obr. 24 Elektrická ohýbačka UNI 42A.....	26
Obr. 25 Elektrohydraulická ohýbačka.....	26
Obr. 26 Trhací stroj TIRAtest 2300 .....	27
Obr. 27 Graf statické tahové zkoušky pro vzorek trubky 12 x 1 .....	28
Obr. 28 Měřidlo Mitutoyo Crysta-PlusM 544 .....	29
Obr. 29 Upnutí trubky ve svěráku.....	30
Obr. 30 Samotné měření válců na trubce .....	30
Obr. 31 Graf velikosti naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 10 x 1 .....	31
Obr. 32 Graf velikosti naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 12 x 1 .....	32
Obr. 33 Graf velikosti naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 10 x 1 .....	32
Obr. 34 Graf velikosti naměřeného zpětného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 18 x 1,5.....	33
Obr. 35 Graf závislosti zpětného odpružení K na poměru $R'/D$ pro ocel obdobnou ČSN 11 353 [1] .....	34



Obr. 36 Graf velikosti vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 10 x 1 .....	35
Obr. 37 Graf velikosti vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 12 x 1 .....	35
Obr. 38 Graf velikosti vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 15 x 1,5 .....	36
Obr. 39 Graf velikosti vypočteného odpružení v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 18 x 1,5 .....	37
Obr. 40 Graf velikosti odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 10 x 1 .....	38
Obr. 41 Graf velikosti odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 12 x 1 .....	39
Obr. 42 Graf velikosti odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 15 x 1,5 .....	40
Obr. 43 Graf velikosti odpružení (vypočteném a naměřeném) v závislosti na úhlu ohybu trubky o průměru 18 x 1 .....	41
Obr. 44 Graf změny součinitele zpětného odpružení K dle úhlu nastavení pro trubku 10 x 1 .....	42
Obr. 45 Graf změny součinitele zpětného odpružení K dle úhlu nastavení pro trubku 12 x 1 .....	43
Obr. 46 Graf změny součinitele zpětného odpružení K dle úhlu nastavení pro trubku 15 x 1,5 .....	43
Obr. 47 Graf změny součinitele zpětného odpružení K dle úhlu nastavení pro trubku 18 x 1,5 .....	44
Obr. 48 Výsledné velikosti přehybu trubky pro všechny trubky .....	45



## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha I      Výňatek z kalibračního listu měřidla Mitutoyo Crysta-PlusM 544

## Příloha č. 1

### „Výňatek z kalibračního listu a technické údaje měřidla“

Ke 3D měřicímu stroji se jednou za určitý čas dělá jeho kalibrační list, který obsahuje technická data přístroje, chyby měření a potvrzení o zkalibrování. Tento přístroj byl naposledy zkalibrován 11. 04. 2012 a vše je v pořádku.

Důležité technické data stroje:

Název a typ: Mitutoyo Crysta-PlusM544

Výrobní číslo: N0231709

Měřicí rozsah: X-ová Osa = 505 mm

Y-ová Osa = 405 mm

Z-ová Osa = 405 mm

Rozlišení délkového měřicího systému: 0.0005 mm

Dotekový systém: TP20

Jmenovitý průměr (koule měřicí sondy): 4 mm

Délka dřívku: 20 mm

Maximální dovolené chyby:

Maximální dovolené chyby dle DIN EN ISO 10 360-2:2002 a DIN EN ISO 10 360-4:2002

Odchylka chyby celkového měření:  $MPE_E = (3.5 + 4.5 \cdot L/1000) \mu m$

Chyba sondy:  $MPE_P = 4.0 \mu m$

Nejistota měření:

Pro chybu sondy:  $U_P = 0.3 \mu m$

Pro chybu délkového měření:  $U_E = 1.0 + 1.2 \cdot 10^{-6} \cdot L$

Pro chybu skenovací sondy  $U_{THP} = 0.6 \mu m$

Ta vyplývá ze standardní nejistoty měření násobením činitelem  $k = 2$  pro přesahující pravděpodobnost 95%.

Délkové výsledky měření jsou platné při teplotě uvedené v kalibračním listu.

Teplotní kompenzace souřadnicového měřicího stroje vychází z referenční teploty 20°C.“ [13]

**Prohlášení:**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24. 05. 2013

Podpis:

**Declaration:**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and consultant.

Date: 24. 05. 2013

Signature: